

MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES PARA LAS VARIABLES DE CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS FINOS DE LA CIUDAD DE TARIJA

PROBABILITY DISTRIBUTION MODELS FOR THE CONSOLIDATION
VARIABLES OF FINE SOILS IN THE CITY OF TARIJA

Fecha de recepción: 10/07/2025 | Fecha de aceptación: 22/07/2025

Autor(es):

*** Laura Karina Soto Salgado**

Docente U.A.J.M.S.

* Correspondencia del autor(es): laraksosal@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7324-2850>.



Modelos de Distribución de Probabilidades para las Variables de Consolidación de los Suelos Finos de la Ciudad de Tarija

Probability Distribution Models for the consolidation variables of fine Soils in the City of Tarija

Resumen

Se ha seleccionado el modelo de distribución de probabilidades más apropiado para cada una de las variables más relevantes relacionadas con el fenómeno de la consolidación, y, con esos modelos, se ha calculado varios percentiles que son útiles para tomar decisiones de análisis o diseño geotécnico.

Abstract

The most appropriate probability distribution model has been selected for each of the most relevant variables related to the consolidation phenomenon, and, with these models, several percentiles have been calculated that are useful for making geotechnical analysis or design decisions.

1. 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 sue-

lo, 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 probabilísti-

Palabras Claves: Modelos de distribución de probabilidades; Consolidación; Percentiles; Suelos finos.

Keywords: Probability distribution models; Consolidation; Percentiles; Fine soils

cos 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.

2. 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 (Statpoit 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).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. 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.

3.2. 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_o	σ'_c (kN/m ²)	C_c
n	24	24	24	24
$\bar{M}$	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)

Indica- dor	Cr	Cs	Cv (m ² /min)	S (m)
n	24	24	24	24
$\overline{M}$	0,0131	0,00029	0,0000186	0,368
DS	0,0045	0,001	0,0000111	0,062
COV	0,35	3,44	0,60	0,17
Min	0,005	0,00001	0,0000094	0,21
Max	0,023	0,005	0,0000540	0,47

En los cuadros 1 y 2:

n = tamaño de la muestra ó serie estadística de trabajo = 24; $\overline{M}$ = 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_o** = relación de vacíos inicial; σ'_c = esfuerzo de preconsolidación (kN/m²);**C_c** = índice de compresión;**C_r** = índice de recompresión;**C_s** = índice de expansión;**C_v** = coeficiente de consolidación;**S** = asentamiento (m).

3.3. 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.

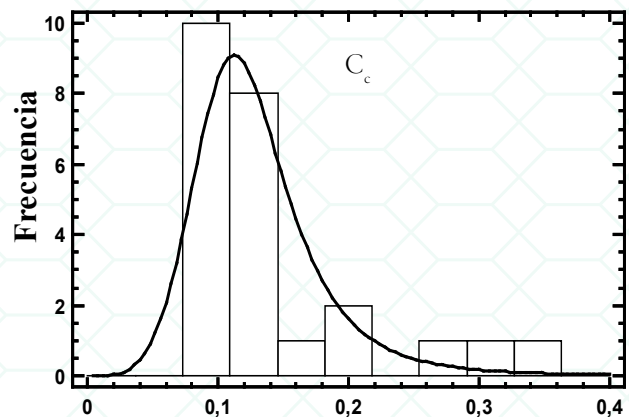
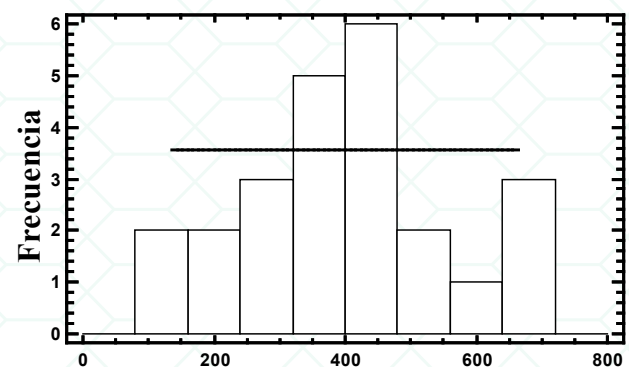
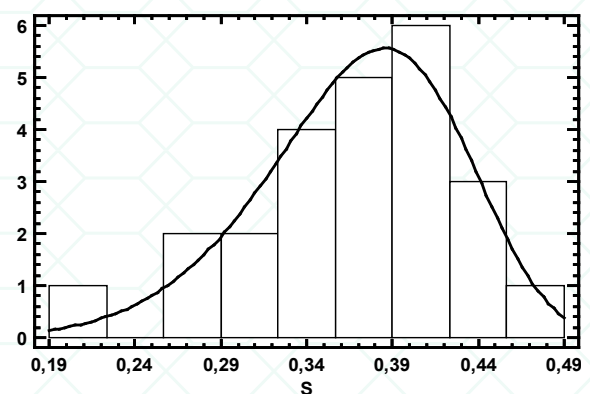
Figura 1: Distribución de Probabilidades Logística para C_c Figura 2: Distribución de Probabilidades Uniforme para σ'_c 

Figura 3: Distribución de Probabilidades Weibull para S



Cuadro 3: Resumen de modelos de Distribución de Probabilidades
(Variables de Consolidación)

VARIABLE	MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES
w	Uniforme
e_o	Valor Extremo Más Chico
σ'_c	Uniforme
C_c	Log Logística
C_r	Gamma
C_s	Log Logística
C_v	Gaussiana Inversa
S	Weibull

4. 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)

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

Per = Percentil.

5. 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.

6. 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 Ciencia Sur 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 Reynoso, A. (2020). Geotechnical and mechanical properties of soils: correlations, mathematical models and implications in structural and geotechnical engineering with emphasis in Bolivian soils. Post Doctorate Thesis, Atlantic International University, USA.
- ▶ Benítez Reynoso, 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 Reynoso, A. (2018). Principios Dialécticos de la Ingeniería Estructural e Implicaciones en la Seguridad, “Congreso Panamericano en Seguridad, Construcciones Seguras y Manejo de Desastres”, Cartagena de Indias, 10 y 11, en el marco de la XXXVI Convención de la UPADI (Unión Panamericana de Asociaciones de Ingenieros).
- ▶ Benítez Reynoso, A. (2017). Propiedades mecánicas de las arcillas bolivianas: modelos matemáticos, correlaciones e implicaciones en la Ingeniería Estructural. PRIMER CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 26-28 de octubre, Tarija (Bolivia).
- ▶ Benítez Reynoso, 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 Reynoso, A. (2014). Dialéctica de la Ingeniería Estructural. Convenio Andrés Bello, Universidad Nacional Siglo XX e Instituto Internacional de Integración. Depósito Legal: 4-1-1568-14,

ISBN: 978-99954-98-15-3, La Paz (Tesis Doctoral y Libro).

- ▶ Benítez Reynoso, 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 Reynoso, 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 Reynoso, A. (2004). Generalización de las relaciones entre los procesos del ciclo hidrológico para la cuenca internacional del río de La Plata: "Enfoque Sistémico y Análisis Multivariado". Tesis de doctorado, Universidad de Sevilla, España.
- ▶ Benítez Reynoso, A. (2001). Criterios hidrológicos aplicados a la Ingeniería Vial, un breve análisis metodológico y conceptual. Revista Rutas, No. 78 – II época, mayo-junio, pp. 33-40, Madrid, España.
- ▶ Benítez Reynoso, 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.
- ▶ Benítez Reynoso, 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 Reynoso, 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 Reynoso, 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 Reynoso, 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 Reynoso, 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 ICS-MFE, 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.