

PROPAGACIÓN DEL INCREMENTO DE ESFUERZOS VERTICALES EN UN SUELO AGRÍCOLA DE TARABUCO: MÓDULO DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTE DE POISSON EN SUELOS NO SATURADOS

Torrico, J.A.a, Barahona, C b, Di Emidio, G.c, Cornellis, W. d, Rojas, J.C. e, Bezuijen, A. f

^a Responsable Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), doctorando en Ingeniería Civil Universidad de Gante-Bélgica, Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Planta baja, Sucre, Bolivia. E-mail: JuanAlfredo.TorricoBravo@UGent.be

^b Doctorando de Universidad de Gante, Departamento de ingeniería civil. E-mail: christianbarahona07@outlook.com.

^c Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de ingeniería civil. E-mail: Gemmina.DiEmidio@ugent.be.

^d Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de Biociencias, Universidad de Gante. E-mail: Wim.Cornelis@ugent.be.

^e Docente titular de la carrera de ingeniería civil, Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: geotecnia@gmail.com.

^f Director del laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Gante, Universidad de Gante. E-mail: Adam.Bezuijen@ugent.be.

Recibido: 03/10/2025

Aceptado: 10/10/2025

Publicado: 10/11/2025

RESUMEN

El presente artículo determina y evalúa los parámetros elásticos del suelo "Módulo de elasticidad" y "Coeficiente de Poisson" en un perfil parcialmente saturado bajo una succión de 46 kPa. Para el cálculo de estos parámetros se ha realizado un ensayo de laboratorio con un equipo triaxial de suelos no saturados. La muestra empleada ha sido del tipo reconstituida obtenida del sitio de experimentación que es un terreno agrícola ubicado en la localidad de Tarabuco, representada en su perfil estratigráfico por un suelo limo arenoso (ML). Para realizar la medición de la succión matricial se han empleado tensiómetros de campo (modelo Red Fill) a una profundidad de 0.30 m. Los resultados que se han obtenido han sido de 53,72 MPa para el módulo de elasticidad y 0,37 para el coeficiente de Poisson; estos resultados han sido sometidos a comparación respecto a valores referenciales obtenidos en condiciones saturadas (succión nula) y parcialmente saturadas. El análisis comparativo de los resultados ha concluido y comprobado que los parámetros elásticos obtenidos en condiciones parcialmente saturadas son superiores a los valores referenciales en condiciones saturadas, esto debido a la presencia de la succión matricial.

Palabras clave: Módulo de Elasticidad, Coeficiente de Poisson, succión matricial, tensiómetro Red Fill.

ABSTRACT

The present paper assesses the elastic parameters "Elastic Modulus" and "Poisson's ratio" along an unsaturated soil profile with a matric suction of 46 kPa at 0.30m depth. To determine these parameters, a laboratory test was performed through an unsaturated soil triaxial equipment. The sample used was a reconstituted type obtained from the experimental site, that corresponds to an agricultural place located in Tarabuco-Chuquisaca, which are represented in its stratigraphic profile as a sandy silt soil (ML). In order to measure matric suction, field tensiometers (Red Fill model) were used at a depth of 0.30 m. The results obtained were 53.72 MPa for the Elastic Modulus and 0.37 for the Poisson's ratio; these results were compared with respect to values obtained under saturated conditions (zero suction) and unsaturated conditions. The comparative analysis of the results was concluded and verified that the elastic parameters obtained under unsaturated conditions are higher than the reference values under saturated conditions, this due to the presence of matric suction.

Keywords: Hydrometric stations, Arduino, Water resource monitoring.

INTRODUCCIÓN

En términos generales, el módulo de elasticidad es una medida de la rigidez de un material en su estado elástico, mientras que el coeficiente de Poisson es la relación entre las deformaciones transversal y longitudinal de un determinado material, cuando es sometido bajo carga axial.

En los suelos, se debe tener en cuenta que las propiedades mecánicas e hidráulicas de estos no dependen únicamente del tipo de suelo (mineralogía y granulometría), sino que también de la estructura generada durante el proceso de compactación. Cambios en las condiciones de compactación (humedad, densidad seca y energía de compactación) de un mismo suelo conducen a estructuras con diferentes grados de saturación en consecuencia, con distintas respuestas frente a las acciones mecánicas e hidráulicas. La Mecánica del Suelo tradicional se ha ocupado principalmente de los suelos saturados. Ello se debe a que, en general, la rigidez y la resistencia de los suelos parcialmente saturados son mayores, por lo que es más conservador suponer que, en cualquier caso, los suelos pueden estar saturados. La mayor resistencia de los suelos en estado parcialmente saturado se debe a la presencia de la succión matricial a través de los denominados meniscos, las interfaces aire-agua-sólido. Por otra parte, el estudio de los suelos saturados es mucho más sencillo. (Tardón, 2014).

La determinación de los parámetros elásticos de un suelo, como son el Módulo Elástico y el coeficiente de Poisson, resulta esencial para conocer el comportamiento de éstos y saben cómo van a fallar. En términos generales, la mayoría de los estudios que han estudiado el coeficiente de Poisson, lo han determinado de un modo indirecto. Estos estudios han obtenido el valor del módulo de elasticidad (E) y del módulo de corte (G) mediante ensayos experimentales, y mediante la relación existente entre ambos módulos han obtenido el coeficiente de Poisson.

Para el cálculo del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson en suelos no saturados, se tiene que incluir una variable adicional, que es la succión matricial; en este sentido, la utilización del equipo tradicional para suelos saturados (equipo triaxial de suelos no saturados) no es viable porque no maneja esta variable.

El objetivo del presente trabajo de investigación es el de determinar los parámetros elásticos del suelo como el módulo de Elasticidad "E" y coeficiente de Poisson "ν" en condiciones parcialmente saturadas. Para ello se va a hacer uso del equipo triaxial de suelos no saturados de la línea MEGARIS con una muestra reconstituida de un terreno de estudio denominado "S2" a predeterminado valor de succión matricial que ha sido medida de forma experimental en el terreno de estudio con los tensiómetros Red Fill de la línea Eijkelkamp. Con los resultados obtenidos, se van a realizar análisis comparativos entre los resultados experimentales y los resultados de tablas tanto en condiciones saturadas como parcialmente saturadas; asimismo, se va a analizar el efecto de la succión matricial en los resultados obtenidos de módulo de elasticidad y coeficiente de poisson.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de experimentación y condiciones no saturadas



Figura 1. Ubicación del terreno de estudio (círculo rojo suelo S2).

La figura 1 muestra una vista en planta de la micro localización terreno de estudio S2. Para una mayor explicación del terreno de estudio se pide recurrir al artículo de una anterior edición

de la revista INGENIUM, mismo autor (Torrice, 2023).

La tabla 1 ilustra un resumen de la caracterización realizada para el mencionado terreno de estudio. Como se aprecia, se trata de un suelo agrícola limo arenoso de baja plasticidad (ML), de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Tabla 1. Caracterización del suelo.

Suelo	Arcilla	Limo	Arena	γ	G_s	SUCS	Cont. Orgánico
	%	%	%	KN/m^3			%
S2	10	52	38	17,2	2,65	ML	0,45

La presente investigación estudia el módulo de elasticidad y el coeficiente de poisson en unos suelos parcialmente saturado; entonces para el ensayo experimental se requiere determinar el valor de la succión matricial que se ha de manejar en laboratorio para la muestra reconstituida. La tabla 2 muestra esta variable, así como la profundidad de análisis:

Tabla 2. Succión matricial.

Suelo	Profundidad	Succión Matricial	Observación
	m	kPa	
S2	0.30	46	Succión registrada en el ensayo de campo

El valor de succión matricial registrado en la tabla 2 corresponde a las mediciones en campo realizadas con los tensiómetros Red fill en el momento de los ensayos (Torrice, 2023).

Determinación experimental del esfuerzo de preconsolidación en laboratorio

Para el presente trabajo de investigación, al tratarse de un estudio experimental en suelos parcialmente saturados, se ha desechado el uso de un equipo triaxial cíclico de suelos saturados y se ha empleado el equipo triaxial de suelos no saturados (Figura 3) teniendo cuidado de realizar una eculización de la succión matricial deseada de 46 kPa para la realización del ensayo y simular las

condiciones de presión de confinamiento a la que está sujeto el suelo en su estado natural cuando se ha efectuado el paso de la maquinaria Jon Deere 6110 D por el perfil de suelo (Torrice, 2023).



Figura 3. Equipo triaxial de suelos no saturados Megaris.

Valor comparativo de tablas del Módulo de Elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Como se ha explicado en la introducción, los valores de módulo de elasticidad y coeficiente de poisson, que se obtengan del ensayo experimental en el equipo de suelos no saturados (Figura 3), serán sometidos a comparación respecto a valores tabulados que se encuentran en la bibliografía clásica. A continuación, en la tabla 3, se muestran los valores de módulo de elasticidad sujetos a comparación obtenidos del autor Obrzud & Truty (2012)

Tabla 3. Valores Típicos de Módulo de Elasticidad (Obrzud & Tuty, 2012).

Tipo de SUELO	E según consistencia		
	Muy suelta a suelta (KPa)	Mediana (KPa)	Rígida a muy rígida (KPa)
ML	1.5 - 6	6-10	10-30

Para seleccionar una de las tres opciones de consistencia que presenta el autor (Obrzud & Tuty, 2012), en función a las condiciones encontradas en el trabajo de campo realizado y las características del suelo agrícola, el valor que le correspondería sería en el rango de 6 a 10 Mpa (consistencia mediana).

En cuanto al coeficiente de Poisson, para el análisis comparativo se tomará como valor tabulado el del autor Kulhawy (1990), de acuerdo a la tabla 4.

Tabla 4. Valores Típicos de Coeficiente de Poisson (Kulhawy, 1990).

Tipo de SUELO	ν
ML	0.30-0.35

Se hace notar que los valores tabulados de las tablas 3 y 4 corresponden a suelos saturados. En cuanto a resultados referenciales de “E” y “ ϵ ” en suelos parcialmente saturados, Jan De Pue (2019) en su Tesis “Advances in modelling vehicle-induced stress transmission in relation to soil compaction” ha empleado valores de módulo de elasticidad y coeficiente de poisson de un suelo similar, obtenidos de funciones de pedotransferencia (pedotransfer functions), los que cuales toman en cuenta a la succión matricial. A continuación, en la tabla 5 se muestra los resultados.

Tabla 5. Valores obtenidos de Módulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson en suelos parcialmente saturados (De Pue, 2019).

Parámetro elástico	Resultado obtenido
E (MPa)	300
	0,4

Se hace notar que De Pue (2019) ha obtenido los valores de “E” y “ ν ” de la tabla 5 con una succión matricial de 33 kPa.

Procedimiento de los ensayos de Módulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson.

A diferencia de los procedimientos de la norma ASTM D3999 que regula un ensayo de módulo de elasticidad para suelos saturados en un equipo triaxial cíclico, en el presente trabajo de investigación se maneja la succión matricial de modo que el equipo triaxial de suelos no saturados de la figura 3 resulta el indicado. Con referencia a la determinación del coeficiente de

Poisson del suelo en estado saturado, no existe una norma específica y se recomienda la utilización de las normas aplicadas a materiales en general, con sus recomendaciones para la medición de las deformaciones transversales. Bajo estas consideraciones, se ha empleado una muestra de suelo reconstituida de 38 mm de diámetro y altura 76 mm con las condiciones de humedad semejantes a las encontradas en campo (18,53 %), la que previamente se ha ecualizado en el equipo para alcanzar la succión matricial de campo registrada de 36 kPa (Tabla 2) en el caso del suelo S1. Posteriormente a la ecualización, cada muestra ha sido sujeta a una presión de confinamiento de 110 kPa similar a la de campo a la profundidad de 0.30 m en el momento del paso del tractor agrícola Jon Deere 6110 D en las condiciones de máxima presión de inflado en los neumáticos (Torrico, 2023), con una velocidad de deformación “C.R.S.” (constant rate of strain) de 0.76 mm/hr y un esfuerzo desviador que ha variado hasta los 1000 kPa. La deformación ha sido medida con un sensor de desplazamiento con una sensibilidad de 1×10^{-6} m. Simultáneamente, el esfuerzo ha sido medido con una célula de carga.

RESULTADOS

Valores del módulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson.

A continuación, en la Figura 4, se muestra la curva de esfuerzo desviador (q) – deformación unitaria longitudinal (ϵ) obtenida del suelo S2. Se observa que en su etapa inicial la variación es lineal y también que el rango elástico es muy reducido. Por estos motivos, los Autores Lambe & Whitman (1969) indican que el módulo de elasticidad de un suelo corresponde al módulo secante de esfuerzo desviador cero (σ_1) a un esfuerzo desviador (q) que será igual a la mitad o a un tercio de la tensión pico del esfuerzo desviador (σ_3), como puede desarrollarse en la ecuación 1 a continuación.

$$E_s = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\epsilon_{1-3}} \quad (Ec. 1)$$

Bajo estas recomendaciones y tomando en cuenta al esfuerzo desviador con el 50 % de la

tenSI3n pico, se ha obtenido de la curva un Esfuerzo (q) de 488 kPa y una deformaci3n unitaria longitudinal (ϵ) de 0,91 %, haciendo con estos datos un m3dulo de elasticidad para el suelo S2 de 53,72 MPa. La deformaci3n unitaria radial obtenida en estas condiciones, que representa a la deformaci3n unitaria transversal, es de 0,33 %, que dividida con respecto a la deformaci3n unitaria longitudinal se ha obtenido un coeficiente de Poisson para el suelo S2 de 0,37 (Figura 4)

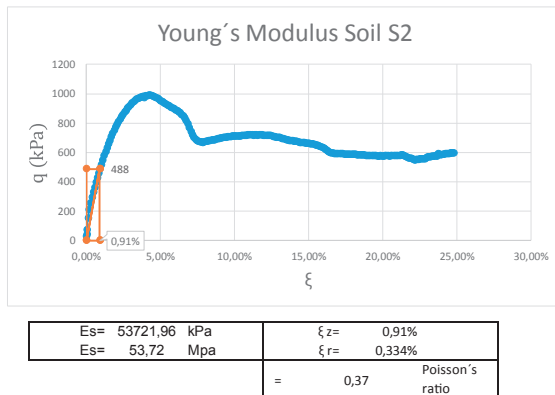


Figura 4. Suelo S2, Parámetros elásticos m3dulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

Análisis comparativo del M3dulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson: Valor de Referencia y ensayo de laboratorio

Haciendo una discusi3n de los valores obtenidos, primeramente se procederá a realizar la comparaci3n de los resultados del suelo analizado en condiciones saturadas. A continuaci3n, la tabla 6 muestra un resumen de los resultados.

Tabla 6. Comparaci3n de Parámetros elásticos Suelo S2 en condiciones saturadas.

Parámetro	Valores obtenidos		
	Tablas (cond. Saturadas)	Ensayo Laboratorio	Diferencia
E (MPa)	8	53,72	571,5%
ν	0,325	0,37	13,8%

Tomando como valor de referencia de 8 kPa para el m3dulo de elasticidad y 0,325 para el

coeficiente de Poisson, que corresponden al promedio de los recomendados en la tabla 3 (6 y 10 kPa en el caso de "E"; 0,30 a 0,35 en el caso de " ν "), se aprecia que los resultados de laboratorio se alejan de los valores tabulados. En el caso del m3dulo de elasticidad, el valor encontrado es casi 7 veces mayor al valor tabulado, y en el caso del coeficiente de Poisson el valor obtenido en laboratorio se aleja en un 14 % respecto al valor tabulado. De manera que un suelo en condiciones saturadas no podría considerarse como parámetro de comparaci3n de éstas propiedades mecánicas del suelo.

Seguidamente, tomando como parámetros de comparaci3n los resultados obtenidos de la tabla 5 (De Pue, 2019) que han sido obtenidos en condiciones parcialmente saturadas, a continuaci3n en la tabla 7 se muestra un resumen de los resultados.

Tabla 7. Comparaci3n de Parámetros elásticos Suelo S2 en condiciones parcialmente saturadas (Succi3n 33 kPa).

Parámetro	Valores obtenidos		
	De Pue (cond. Parcialmente Saturadas)	Ensayo Laboratorio	%
E (MPa)	85	53,72	36,8%
ν	0,337	0,37	9,8%

Se hace notar que la tabla 7 ilustra una enorme diferencia respecto a la tabla 6 con importantes mejoras en las aproximaciones del 36,8 % en el caso del m3dulo de elasticidad y 9,8 % en el caso del coeficiente de Poisson; de manera que se evidencia que en suelos parcialmente saturados los parámetros elásticos se incrementan debido a la presencia de la succi3n matricial.

Efecto de la succi3n matricial en los parámetros elásticos M3dulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson

Para interpretar el efecto de la succi3n matricial en la determinaci3n de los parámetros elásticos

del suelo analizado, tanto en los ensayos de laboratorio como en los valores de referencia presentados, se ha conformado la siguiente tabla 8.

Tabla 8. Succión Matricial en los parámetros elásticos del suelo "S2".

Condiciones	Parámetro elástico		Succión Matricial (KPa)
	E (MPa)	ν	
Saturadas (Obrzud & Tuty, 2012).	8	0,325	0
Parcialmente saturadas (Laboratorio)	53,72	0,37	46
Parcialmente saturadas (De Pue, 2019)	85	0,337	33

La tabla 7 muestra claramente en ambos ensayos que la presencia de la succión matricial, que en este caso de estudio del suelo "S2" ha sido de 46 kPa, ha generado un aumento del módulo de elasticidad "E", a 53,72 MPa, y del coeficiente de Poisson, a 0,37. Estos resultados mejoran los resultados de Obrzud & Tuty (2012) los cuales han sido obtenidos en condiciones saturadas (succión matricial nula) del mismo tipo de suelo (ML).

Los resultados de De Pue (2019) que también han sido obtenidos tomando en cuenta la succión matricial, presentan este mismo patrón de mejora en cuanto a los parámetros elásticos.

CONCLUSIONES

La presente investigación ha cumplido con la determinación de los parámetros elásticos una muestra reconstituida del suelo analizado S2 en condiciones parcialmente saturadas a una succión matricial de 46 kPa. Los resultados obtenidos han sido de 53,72 MPa en cuanto al módulo de elasticidad "E" y de 0,37 en cuanto al coeficiente de Poisson " ν ".

Se ha realizado la comparación de los resultados obtenidos de los parámetros elásticos con respecto a trabajos en condiciones saturadas (Obrzud & Tuty, 2012) y condiciones parcialmente saturadas (De Pue, 2019). Se concluye que los resultados en condiciones saturadas se alejan considerablemente, en especial con respecto al módulo de elasticidad "E". Existe una considerable mejora en la correlación entre los resultados obtenidos en condiciones parcialmente saturadas (De Pue, 2019); de 36,8 % en el caso de "E" y 9,8 % en el caso de " ν ". De modo que los resultados obtenidos, realizados en condiciones parcialmente saturadas, mejoran considerablemente las propiedades elásticas de un suelo.

Para la presente investigación el efecto de la succión matricial es notorio, para mejora, en ambas propiedades elásticas del suelo analizado. En el caso del módulo de elasticidad, un incremento de 46 kPa de la succión matricial respecto a las condiciones saturadas (succión matricial nula) ha generado un incremento de casi 7 veces en "E". Esta mejora considerable también ha sido comprobada con el estudio de De Pue (2019), el cual también ha utilizado la succión matricial. En el caso del coeficiente de Poisson la mejora ha existido en cuanto a su deformabilidad transversal, pero no tan evidente como en el caso del módulo de elasticidad.

El presente trabajo de investigación está enfocado en los suelos agrícolas de Tarabuco, sin embargo, este tiene una gran aplicación en el campo de la ingeniería civil en el sentido que la succión matricial se considera como una medición indirecta de la resistencia a la tracción del suelo, y es un aporte más para comprender la capacidad del suelo para mantener esfuerzos de tracción sin perder su estabilidad, en especial en el momento de la acción de cargas externas. Con la comprensión de este fenómeno es posible diseñar y construir estructuras, en todas las áreas de la ingeniería civil, que van a poder soportar condiciones ambientales variables en su etapa de operación, conllevando a ser una herramienta más para la ejecución de proyectos civiles más seguros y sostenibles.

Para futuras investigaciones, de acuerdo con el diseño experimental de nuestro estudio de doctorado, se tiene planificado realizar la simulación de los resultados experimentales obtenidos en campo. Para este propósito se empleará la metodología de modelación D.E.M. (Discrete Element Modelling), en la cual los resultados obtenidos en el presente estudio junto con otros adicionales como la cohesión y el ángulo de fricción servirán como parámetros de entrada.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación ha sido financiado por la cooperación internacional VLIR-UOS (Consejo Flamenco de Interuniversidades para la cooperación y el desarrollo). Agradecemos a VLIR-UOS por el financiamiento bajo el proyecto de investigación VLIR ZEIN2016PR416-75155. El terreno para realizar los ensayos, así como el tractor agrícola utilizado en los ensayos con las células de carga, han sido gentilmente facilitados por la Honorable Alcaldía del Municipio de Tarabuco.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Tardón, N. (2014). Obtención de parámetros elásticos en suelos no saturados mediante técnicas de tratamiento de imágenes. Tesina de Especialidad. UPC **Universidad Politécnica de Cataluña**, Escuela de Caminos. Barcelona, España.

Torrice, J.A., Di Emidio, G., Cornellis, W., Rojas, J.C., & Bezuijen, A. (2022). Efecto de la presión de los neumáticos en la distribución de esfuerzos verticales generados por el paso de un tractor en un perfil limo arenoso. **INGENIUM 3**, 37-45. **ISSN 2709-7048**.

Torrice, J.A., Di Emidio, G., Cornellis, W., Rojas, J.C., & Bezuijen, A. (2023). Propagación del incremento de esfuerzos verticales en un suelo agrícola de Tarabuco: Efecto de la succión

matricial y análisis comparativo. **INGENIUM 4**, 23-38.

Obrzud, R. & Truty, A. (2012). The Hardening Soil Model – A practical guidebook. Soil.PC 100701 report. **Revised 31.01.2012**.

Kulhawy, F.H & Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. Ithaca, New York. 1990. Print.

De Pue, J., (2019). Advances in modelling vehicle-induced stress transmission in relation to soil compaction. Ghent University. PhD Thesis. **ISBN 978-94-6357-249-1**

American Society for Testing and Materials ASTM. (2003). ASTM D3999 Standard Test Methods for the Determination of the Modulus ad Damping Properties o Soils Using te Cyclic Triaxial Apparatus. ASTM International, 100 Barr Harbour Dr.,P.O. Box C-700 West Conshohocken, Pennsylvania 19428-2959, United States.

Lambe, T.W & Whitman, V.R. (1969). Soil Mechanics. Jhon Wiley and Sons, 1969, 576 p. ISBN: 978-0-471-51192-2