

Propagación del incremento de esfuerzos verticales en un suelo agrícola de Tarabuco: Esfuerzo de preconsolidación 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: 03/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Publicado: 10/11/2024

RESUMEN

El presente artículo evalúa el riesgo de compactación debido al paso de maquinaria agrícola por un perfil de suelo no saturado a través del concepto de esfuerzo de preconsolidación, que es la frontera entre el estado elástico y plástico de un suelo. Para el cálculo del esfuerzo de preconsolidación, se han realizado simulaciones con el software TERRANIMO y ensayos de consolidación unidimensionales con un equipo triaxial de suelos no saturados. El sitio de experimentación ha consistido de dos terrenos agrícolas ubicados en la localidad de Tarabuco, ambos constituidos en su perfil estratigráfico por un suelo limo arenoso (ML). El tractor agrícola es un modelo John Deere 6110D, con una presión de inflado aplicada a los neumáticos de 83 kPa. Para realizar la medición de la succión matricial se han empleado tensiómetros de campo (modelo Red Fill) a una profundidad de 0.30 m. Con los resultados que se han obtenido se ha concluido que los dos terrenos de experimentación no alcanzan su estado plástico y no existe riesgo de compactación con las condiciones de presión de inflado impuestas, las simulaciones y los ensayos de laboratorio del esfuerzo de preconsolidación han presentado correlaciones de 1.69 % y 10.72 %. Finalmente, se ha encontrado que un incremento de 10 kPa en la succión matricial ha generado un incremento del 7% del esfuerzo de preconsolidación.

Palabras clave: Esfuerzo de Preconsolidación, succión matricial, Terranimo, tensiómetro Red Fill.

ABSTRACT

The present paper assess the risk of soil compaction through an unsaturated profile due to the passage of agricultural machinery following the concept of precompression stress, which is the threshold between the elastic and plastic state of a unsaturated soil. In order to calculate the precompression stress, simulations have been carried out with the TERRANIMO software; and laboratory one-dimensional consolidation tests, with a unsaturated soils triaxial apparatus. The experimental site consisted by two agricultural places located in Tarabuco, both constituted in their stratigraphic profile by a sandy silt soil (ML). The tractor is a John Deere model 6110D, employing an inflation pressure of 83 kPa to the both tires. For the measurements of matric suction, it was employed Tensiometers (Red Fill type) at a depth of 0.30 m. With the results obtained, it has been concluded that the two experimental fields do not reach their plastic state and there is no risk of soil compaction with the imposed inflation pressure conditions, simulations and laboratory tests of the precompression stress provided correlations of 1.69 % and 10.72 %. Finally, it has been found that an increase of 10 kPa in matric suction generated a 7% on the increase in precompression stress.

Key words: Precompression stress, Matric suction, Terranimo software, Red Fill Tensiometers.

INTRODUCCIÓN

El esfuerzo de preconsolidación (P.C.S.) es comúnmente usado como un indicador de la capacidad de carga de un suelo y del historial de esfuerzos del mismo (De Pue, 2019).

También, el esfuerzo de Preconsolidación es considerado como un límite teórico de esfuerzos, en el cual la deformación de un suelo pasa de un comportamiento elástico a uno plástico. Es típicamente determinado a partir de una relación esfuerzo-deformación logarítmica en un ensayo de compresión uniaxial (Edómetro). Originalmente, este método fue desarrollado para aplicaciones geomecánicas en suelos saturados y largos tiempos de carga para resolver problemas de fundaciones y estabilidad de taludes; sin embargo, se ha demostrado que también es posible aplicar este esfuerzo de preconsolidación a la mecánica de suelos saturados (Horn, 1981).

El cálculo del esfuerzo de preconsolidación fue originalmente propuesto por Casagrande en el año 1936. El método de Casagrande es una solución gráfica que encuentra la intersección entre la línea bisectriz entre el punto de máxima curvatura y la línea de compresión virgen (V.C.L., i.e. la línea que se encuentra en la parte plástica de la curva esfuerzo deformación del suelo). A partir de la solución de Casagrande, diversos métodos automatizados han sido desarrollados (Dawidowski y Koolen, 1994; Baumgartl y Köck, 2004; Rücknagel et al., 2010) y varias soluciones alternativas, basadas en regresión lineal, han sido propuestas (Schmertmann, 1955; McBride and Joosse, 1996; Junior and Pierce, 1995).

La proliferación de métodos de cálculo del esfuerzo de preconsolidación ilustra la falta de consenso en cuanto a la interpretación de su resultado. Esa falta de estandarización en cuanto a su cálculo infravalora la usabilidad del P.C.S. (Keller et al., 2011). En general, el esfuerzo de preconsolidación muestra una alta variabilidad en muchos casos. Esto es mayormente atribuible a la heterogeneidad de las muestras (Baumgartl y Köck, 2004; Cavalieri et. al., 2008), sin embargo la robustez de los métodos de cálculo del P.C.S. es una pregunta abierta.

Actualmente, está vigente la norma ASTM D2435, la cual está enfocada en el procedimiento experimental del ensayo y la obtención de la curva edométrica, que es una curva logarítmica que relaciona el esfuerzo normal y la relación de vacíos. Esta norma, si bien habla del método de Casagrande, no normaliza el cálculo del esfuerzo de preconsolidación.

Para el cálculo del esfuerzo de preconsolidación 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 (edómetro) no es viable porque no maneja esta variable.

El objetivo del presente trabajo de investigación es el de verificar si el suelo analizado ha experimentado daño por compactación o ha ingresado a su estado plástico mediante el concepto de Esfuerzo de Preconsolidación (P.C.S.). Para ello se van a realizar dos simulaciones de ensayo de preconsolidación en dos terrenos de estudio denominados "S1" y "S2", debido al paso de maquinaria sobre un suelo agrícola en la localidad de Tarabuco, con el software TERRANIMO. También se van a realizar dos ensayos de preconsolidación en suelos no saturados, a predeterminados valores de succión matricial en los mismos terrenos de estudio "S1" y "S2", pero de forma experimental utilizando un equipo triaxial de suelos no saturados. Con los resultados obtenidos, se van a realizar análisis comparativos entre los resultados experimentales y los resultados de simulación (software TERRANIMO) para evaluar su correlación; asimismo, se va a analizar el efecto de la succión matricial en los resultados obtenidos de esfuerzo de preconsolidación y finalmente, se va a comprobar si los ensayos de campo con la maquinaria empleada, han provocado que los suelos "S1" y "S2" ingresen a un estado plástico o sufran daño por compactación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de experimentación y condiciones no saturadas

La figura 1 muestra una vista en planta de los dos terrenos de estudio S1, S2. Para una mayor explicación se pide recurrir al artículo de la anterior edición de la revista, mismo autor.

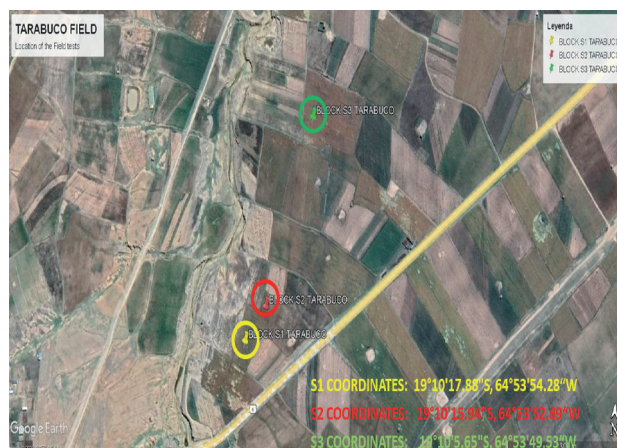


Figura 1. Ubicación de los terrenos de estudio (círculo amarillo S1, rojo S2).

La tabla 1 es un resumen de la caracterización. 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 %	g_{KN/m^3}	G_s	SUCS	Cont. Orgánico %
S1	8	48	44	17,0	2,64	ML	0,52
S2	10	52	38	17,2	2,65	ML	0,45

La presente investigación estudia el esfuerzo de preconsolidación en suelos no saturados; entonces para las simulaciones y los ensayos experimentales se requiere el valor de la succión matricial que se ha de manejar en ambos. La tabla 2 muestra esta variable, así como la profundidad:

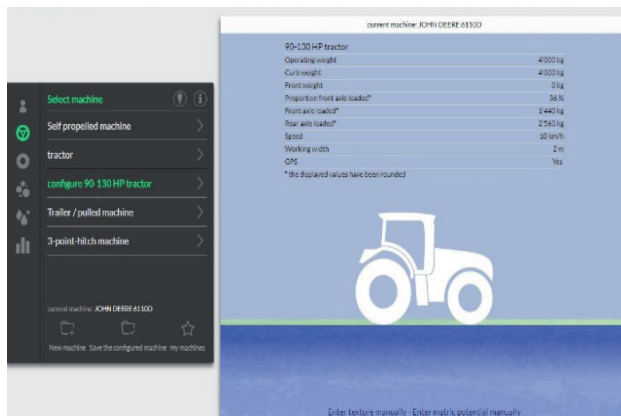
Tabla 2. Succión matricial

Suelo	Profundidad m	Succión Matricial kPa	Observación
S1	0.30	36	Succión registrada en el ensayo de campo
S2	0.30	46	Succión registrada en el ensayo de campo

Los valores de succión matricial registrados en la tabla 2 corresponden a las mediciones en campo realizadas con los tensiómetros red fill en el momento de los ensayos (Torrico, 2023).

Simulación del esfuerzo de Preconsolidación software TERRANIMO

Terranimo es un software de acceso libre que se encuentra en la web (www.terranimoworld.com), el cual evalúa el riesgo de compactación del suelo debido al paso de maquinaria agrícola. El software utiliza como datos de entrada a la textura del suelo analizado, su contenido orgánico, densidad aparente y succión matricial a diversas profundidades (Torrico et. al., 2022). Es necesario hacer notar que para la presente investigación se ha simulado en el software las condiciones normales de presión de inflado, es decir 83 kPa para el neumático delantero y trasero del tractor Agrícola John Deere 6110 D como se muestra en la figura 2 (Torrico et. al., 2023).

**Figura 2.** Interfaz del software Terranimo

Determinación experimental del esfuerzo de preconsolidación en laboratorio

**Figura 3.** Equipo triaxial de suelos no saturados

Al tratarse de un estudio experimental en suelos no saturados, se ha desechado el uso del edómetro convencional y se ha empleado un equipo triaxial de suelos no saturados (Figura 3) teniendo cuidado de realizar una ecualización de la succión matricial deseada para los dos ensayos y simular las condiciones de presión confinante a la que está sujeto el suelo antes del paso de la maquinaria.

Procedimiento de la simulación en el software TERRANIMO

Como se ha explicado, el software ha sido introducido con datos de entrada correspondientes de las Tablas 1 y 2, adicionalmente a esos datos se ha requerido información de las presiones de inflado de los neumáticos (Tabla 3). Se hace notar que en el presente trabajo de investigación solamente se han empleado las condiciones de presión de inflado recomendada de la Tabla 3, es decir 83 kPa para el neumático delantero y 83 kPa para el neumático trasero.

Tabla 3. Variación de la presión de inflado

Presiones de inflado utilizadas

Tipo de Neumático	recomendada (KPa)	intermedia (KPa)	máxima (KPa)
13.6R24	83	138	193
18.4R34	83	110	138

Procedimiento de los ensayos de Esfuerzo de preconsolidación

A diferencia de los procedimientos de la norma ASTM D2435 que regula un ensayo de preconsolidación en suelos saturados, en el presente trabajo de investigación se han utilizado dos muestras de suelos no saturados de 38 mm de diámetro y altura 76 mm, las que previamente

se han ecualizado para alcanzar las succiones matriciales de campo registradas de 36 kPa, en el caso del suelo S1, y 46 kPa, en el caso del suelo S2. Posteriormente a la ecualización, cada muestra ha sido sujeta a incrementos de carga de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, y 500 kPa con una diferencia de 24 horas cada uno. 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

Simulaciones del esfuerzo de preconsolidación con el Software Terranimo

A continuación, se muestran los resultados de la simulación en el software TERRANIMO con las condiciones impuestas de presión de inflado recomendada; en la Figura 4 para el caso del ensayo con el suelo S1, y en la Figura 5 para el caso del Ensayo con el suelo S2.

Para el suelo S1, en la figura 4 se muestran varios resultados. Para el presente trabajo de investigación interesa la columna "Soil strength", la cual para el software TERRANIMO corresponde al Esfuerzo de Preconsolidación. También interesa la columna "Depth", que es la profundidad y dentro de este parámetros la profundidad a analizar es de 30 cm como se ha indicado en la Tabla 2. Para estas condiciones, el esfuerzo de preconsolidación obtenido que se ha simulado con el software es de 2.62 Bar que equivale a 262 kPa, valor que se utilizará para comparar con los resultados experimentales de laboratorio.

Depth (cm)	Soil Strength (bar)	Soil stress-Left front wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Right front wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Left rear wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Right rear wheel 90-130 HP tractor (bar)	Clay content in the soil (%)	Matric potential in the soil (cbar)
0cm	2,69	1,56	1,56	1,44	1,44	8	38
5cm	2,69	1,28	1,28	1,27	1,27	8	38
10cm	2,69	0,99	0,99	1,11	1,11	8	38
15cm	2,69	0,77	0,77	0,94	0,94	8	38
20cm	2,69	0,59	0,59	0,77	0,77	8	38
25cm	2,62	0,45	0,45	0,64	0,64	8	36
30cm	2,62	0,36	0,36	0,52	0,52	8	36
35cm	2,48	0,29	0,29	0,43	0,43	8	33
40cm	2,48	0,23	0,23	0,36	0,36	8	33
45cm	2,36	0,19	0,19	0,3	0,3	8	30
50cm	2,36	0,16	0,16	0,26	0,26	8	30
55cm	2,36	0,14	0,14	0,22	0,22	8	30
60cm	2,36	0,12	0,12	0,19	0,19	8	30
65cm	2,36	0,1	0,1	0,17	0,17	8	30
70cm	2,36	0,09	0,09	0,15	0,15	8	30
75cm	2,36	0,08	0,08	0,13	0,13	8	30
80cm	2,36	0,07	0,07	0,12	0,12	8	30
85cm	2,36	0,06	0,06	0,1	0,1	8	30
90cm	2,36	0,05	0,05	0,09	0,09	8	30
95cm	2,36	0,05	0,05	0,09	0,09	8	30
100cm	2,36	0,04	0,04	0,08	0,08	8	30

Figura 4. Suelo S1, simulación del Esfuerzo de Preconsolidación en TERRANIMO.

Para el suelo S2, en la figura 5, tal cual como en el suelo S1, se muestran varios resultados. Para el presente trabajo de investigación interesa la columna "Soil strength", la cual para el software TERRANIMO corresponde al Esfuerzo de Preconsolidación. También interesa la columna "Depth", que es la profundidad y dentro de este parámetros la profundidad a analizar es de 30 cm como se ha indicado en la Tabla 2 del presente trabajo de investigación. Para estas condiciones, el esfuerzo de preconsolidación obtenido que se ha simulado con el software es de 3.16 Bar que equivale a 316 kPa, valor que se utilizará para comparar con los resultados experimentales de laboratorio.

Depth (cm)	Soil Strength (bar)	Soil stress-Left front wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Right front wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Left rear wheel 90-130 HP tractor (bar)	Soil stress-Right rear wheel 90-130 HP tractor (bar)	Clay content in the soil (%)	Matric potential in the soil (cbar)
0cm	3,23	1,61	1,61	1,48	1,48	10	48
5cm	3,23	1,3	1,3	1,31	1,31	10	48
10cm	3,23	1	1	1,13	1,13	10	48
15cm	3,23	0,76	0,76	0,94	0,94	10	48
20cm	3,23	0,58	0,58	0,77	0,77	10	48
25cm	3,16	0,45	0,45	0,63	0,63	10	46
30cm	3,16	0,35	0,35	0,52	0,52	10	46
35cm	3,05	0,28	0,28	0,42	0,42	10	43
40cm	3,05	0,23	0,23	0,35	0,35	10	43
45cm	2,94	0,19	0,19	0,3	0,3	10	40
50cm	2,94	0,16	0,16	0,25	0,25	10	40
55cm	2,94	0,13	0,13	0,22	0,22	10	40
60cm	2,94	0,11	0,11	0,19	0,19	10	40
65cm	2,94	0,1	0,1	0,16	0,16	10	40
70cm	2,94	0,08	0,08	0,14	0,14	10	40
75cm	2,94	0,07	0,07	0,13	0,13	10	40
80cm	2,94	0,07	0,07	0,11	0,11	10	40
85cm	2,94	0,06	0,06	0,1	0,1	10	40
90cm	2,94	0,05	0,05	0,09	0,09	10	40
95cm	2,94	0,05	0,05	0,08	0,08	10	40
100cm	2,94	0,04	0,04	0,07	0,07	10	40

Figura 5. Suelo S2, simulación del Esfuerzo de Preconsolidación en TERRANIMO.

Ensayo de Esfuerzo de Preconsolidación en laboratorio

A continuación, en las figuras 6 y 7, se muestran las curvas de consolidación de los suelos analizados S1 y S2, respectivamente.

El método utilizado en el presente trabajo de investigación es el de Junior an Pierce (1995). La tesis de doctorado de Jan De Pue (2019) concluye que uno de los métodos de cálculo más recomendados para calcular el esfuerzo de Preconsolidación es el de Junior and Pierce.

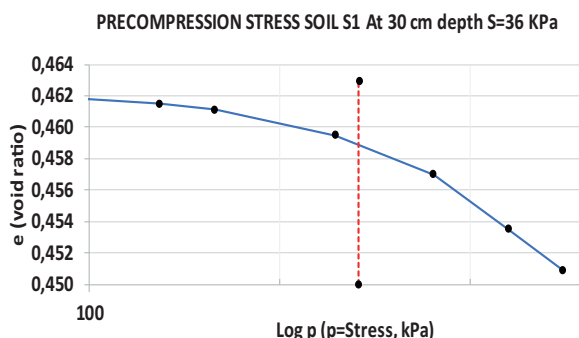


Figura 6. Suelo S1, Ensayo de laboratorio del Esfuerzo de Preconsolidación a una succión matricial de 36 kPa a 0.30 m de profundidad.

Como se observa en la figura 6, el esfuerzo de preconsolidación obtenido para el suelo S1 es de 266.50 kPa, que comparado con el obtenido en la simulación (Figura 4) de 262 kPa, no difiere mucho (4.5 kPa de diferencia).

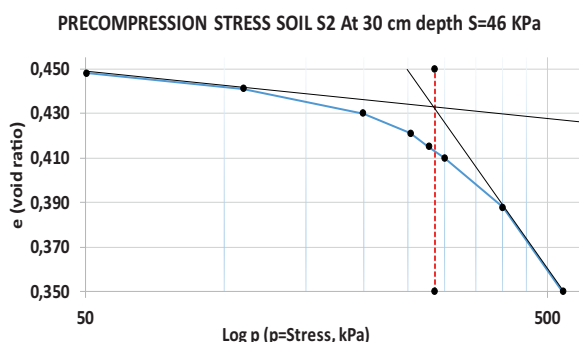


Figura 7. Suelo S2, Ensayo de laboratorio del Esfuerzo de Preconsolidación a una succión matricial de 46 kPa a 0.30 m de profundidad.

La figura 7 muestra el ensayo de preconsolidación para el suelo S2 a una succión matricial de 46 kPa y una profundidad de 0.30 m. Para este suelo se ha obtenido un esfuerzo de Preconsolidación de 285.40 kPa, el cual comparado con el esfuerzo obtenido en la simulación (316 kPa) difiere un poco más que en el suelo S1 (30.6 kPa)

Análisis comparativo del esfuerzo de Preconsolidación: Simulación y ensayo de laboratorio

Tabla 4. P.C.S.: Comparación de resultados

Suelo	Esfuerzo de Preconsolidación		
	Simulación TERRANIMO (KPa)	Ensayo Laboratorio (KPa)	%
S1	262.00	266.50	1.69
S2	316.00	285.40	10.72

La tabla 4 muestra los resultados obtenidos de simulación, con el software TERRANIMO, y laboratorio, con el equipo triaxial de suelos no saturados, de los dos ensayos realizados. Haciendo un análisis comparativo, en el caso del suelo S1 los resultados de simulación del esfuerzo de preconsolidación están subestimados en un 1.69% respecto a los ensayos de laboratorio. En el caso del suelo S2, los resultados de esfuerzo de preconsolidación de las simulaciones en el software TERRANIMO están sobreestimados en un 10.72 % respecto a los ensayos de laboratorio.

Se hace notar que, en ningún caso la variación de resultados supera el 11%, entre simulaciones y ensayos de laboratorio.

Verificación si existe daño en el suelo (estado plástico)

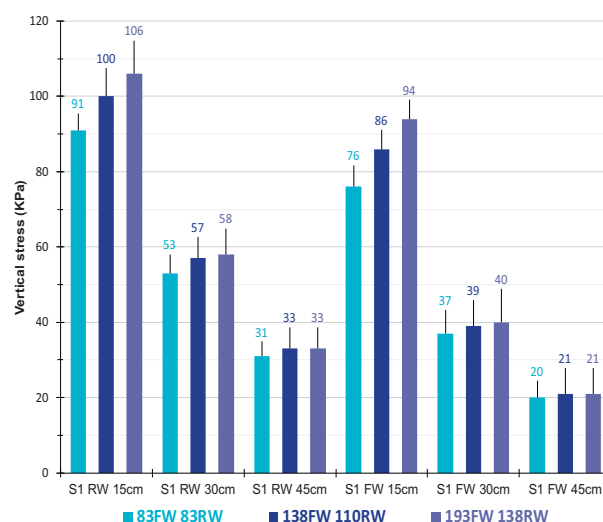


Figura 8. Suelo S1, variación de los esfuerzos verticales generados en los ensayos de campo.

Como se indicó en la introducción del presente estudio, el esfuerzo de preconsolidación es el límite entre el estado elástico y plástico de un suelo. En el caso de la presente investigación, esto resulta de gran importancia para saber si el paso de la maquinaria agrícola sobre los suelos S1 y S2 en los ensayos de campo, ha ocasionado que los esfuerzos en estos perfiles de suelo hayan ingresado en estado plástico. Para verificar esto, se utilizarán los resultados de la Tabla 4 y los resultados de los ensayos de campo en la localidad de Tarabuco que se muestran a continuación en las Figuras 8 y 9.

En la figura 8, que corresponde al suelo S1, si bien sólo interesan para la presente investigación los resultados correspondientes a la presión de inflado recomendada a la profundidad de 0.30 m (barras de color azul del sector S1 RW 30cm y S1 FW 30cm), se puede observar que los máximos esfuerzos verticales alcanzados con el paso de la maquinaria no superan el esfuerzo de preconsolidación obtenido en las simulaciones o los

ensayos de laboratorio, de modo que se confirma que el suelo S1 no ha ingresado a un estado plástico en ningún momento de los ensayos de campo. Para una mejor aclaración de lo que se menciona, se muestra la siguiente Tabla 5 en la que se extraen los resultados de la tabla 4 y la figura 8 para verificar que el suelo S1 no ingresa a un estado plástico.

Tabla 5. P.C.S. suelo S1: Comparación de resultados

Esfuerzo de Preconsolidación			
Suelo	Simulación TERRANIMO (KPa)	Ensayo Laboratorio (KPa)	Esfuerzo máximo ensayo de campo (KPa)
S1	262.00	266.50	53

El esfuerzo normal máximo de 53 kPa se ha obtenido de la figura 8 y corresponde al suelo S1, a la profundidad de 0.30 m y al neumático trasero para las condiciones de presión de inflado “recomendada”.

La tabla 5 muestra que esos 53 kPa son inferiores a los esfuerzos de preconsolidación, tanto los simulados con el software TERRANIMO como los obtenidos en laboratorio, de modo que no existe daño en el suelo por el paso de la maquinaria y además está muy lejos de ingresar a su estado plástico.

En la figura 9, que corresponde al suelo S2, si bien sólo interesan para la presente investigación los resultados correspondientes a la presión de inflado recomendada a la profundidad de 0.30 m (barras de color azul del sector S2 RW 30cm y S2 FW 30cm), se puede observar de toda la figura que los máximos esfuerzos verticales alcanzados con el paso de la maquinaria no superan el esfuerzo de preconsolidación obtenido en las simulaciones o los ensayos de laboratorio, de modo que se confirma que el suelo S2 no ha ingresado a un estado plástico en ningún momento de los ensayos de campo.

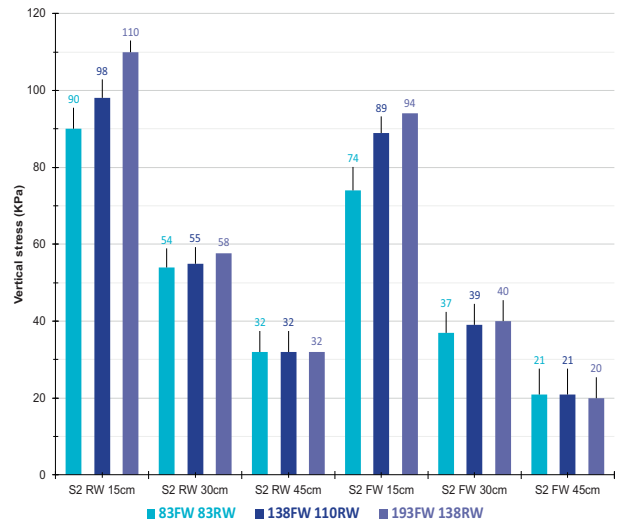


Figura 9. Suelo S2, variación de los esfuerzos verticales generados en los ensayos de campo.

Para una mejor aclaración de lo que se menciona, se muestra la siguiente Tabla 6 en la que se extraen los resultados de la tabla 4 y la figura 9 para verificar que el suelo S2 no ingresa a un estado plástico.

Tabla 6. P.C.S. suelo S2: Comparación de resultados

Esfuerzo de Preconsolidación			
Suelo	Simulación TERRANIMO (KPa)	Ensayo Laboratorio (KPa)	Esfuerzo máximo ensayo de campo (KPa)
S2	316	285.40	54

El esfuerzo normal máximo de 54 kPa se ha obtenido de la figura 9 y corresponde al suelo S2, a la profundidad de 0.30 m y al neumático trasero para las condiciones de presión de inflado “recomendada”.

La tabla 6 muestra que esos 54 kPa son inferiores a los esfuerzos de preconsolidación, tanto los simulados con el software TERRANIMO como los obtenidos en laboratorio, de modo que no existe daño en el suelo por el paso de la maquinaria y además está muy lejos de ingresar a su estado plástico.

Efecto de la succión matricial en el esfuerzo de preconsolidación

Para interpretar el efecto de la succión matricial en el esfuerzo de preconsolidación obtenido en los ensayos de laboratorio y simulaciones con el software TERRANIMO, se ha conformado la siguiente tabla 7

Tabla 7. Succión Matricial en el esfuerzo de preconsolidación.

Esfuerzo de Preconsolidación			
Suelo	Simulación TERRANIMO (KPa)	Ensayo Laboratorio (KPa)	Succión Matricial (KPa)
S1	262.00	266.50	36
S2	316.00	285.40	46

La tabla 7 muestra claramente en ambos ensayos que un aumento en la succión matricial, que en este caso de estudio ha sido de 10 kPa, ha generado un aumento del esfuerzo de preconsolidación, 54 kPa en el caso de las simulaciones, y 18.9 kPa en el caso de los ensayos de laboratorio. Tomando como base los resultados de laboratorio, representa un incremento del 7 % del esfuerzo de preconsolidación. En ambos casos, el incremento de la succión matricial ha generado un incremento en el esfuerzo de consolidación.

CONCLUSIONES

La presente investigación concluye que los suelos analizados "S1" y "S2" no ingresan a su estado plástico y por lo tanto no sufren daño por compactación. Los esfuerzos máximos generados por el paso de la maquinaria, 53 kPa en el caso del suelo S1 y 54 kPa en el caso del suelo S2, están muy por debajo de los esfuerzos de preconsolidación obtenidos, 266.50 kPa en el caso del suelo S1 y 312.00 kPa en el caso del suelo S2, lo que nos permite concluir que no hay daño.

Existe una correlación entre los resultados obtenidos del esfuerzo de preconsolidación; de simulación con el software TERRANIMO y experimental con los ensayos de laboratorio realizados con el equipo triaxial de suelos no saturados. Si bien la correlación es más ajustada en el caso del suelo S1 (1.69 %), en el caso del suelo S2 no deja de ser aceptable (10.72 %).

Para la presente investigación el efecto de la succión matricial es notorio en el esfuerzo de preconsolidación en el sentido de que un incremento de 10 kPa de la succión matricial ha generado un incremento del 7 % en el esfuerzo de preconsolidación. Los ensayos de campo del suelo S1 han sido conducidos con un valor de succión de 36 kPa y los ensayos de campo del suelo S2 han sido conducidos bajo un valor de succión de 46 kPa.

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 modelación de los estudios de campo conducidos en el presente trabajo, pero ahora utilizando el software PLAXIS 2D. Para conducir esta actividad, previamente se realizarán estudios de laboratorio con el equipo triaxial de suelos no saturados para determinar el módulo elástico del suelo analizado y también su coeficiente de poisson, pues estas propiedades mecánicas del suelo son parámetros de entrada que este software avanzado requiere.

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

- 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**
- Torrico, 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. **4**, 23-38.
- Hartge, K. H. & Horn, R. (2016). Essential Soil Physics 1st Edition. Gulde-Druck GmbH & Co. KG. **ISBN 978-3-510-65289-1**.
- Torrico, 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. **3**, 37-45. **ISSN 2709-7048**.
- Lamandé, M., and Schjfnning, P. (2011). Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part I: Site description, evaluation of the Söhne model, and the effect of topsoil tillage. *Soil Till. Res.* **114**, 57-70, doi: 10.1016/j.still.2011.05.004.
- Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaet, P., Keller, T., Mounkholm, L., and Lamandé, M. (2019). The contribution of the tyre evolution to the reduction of soil compaction risks. *Soil Till. Res.* **194**, 104283, doi: 10.1016/j.still.2019.05.029.
- DEERE & COMPANY. (2008). Manual del operador tractors 6100D, 6110D, 6115D, 6125D, 6130D y 6140D Edición H8 (español). Industrias John Deere S.A. de C.V. **A John Deere ILLUSTRATION Manual**.
- FIRESTONE AGRICULTURAL & TRACTOR TIRES. (2020). Load and inflation. **FirestoneAg.com**.
- Torrico, J.A., Miranda, S., Cornellis, W., Rojas, J.C., Di Emidio, G., & Bezuijen, A. (2021). Matric suction effect on distribution of stresses caused by vehicle wheels on a bare silty sand. *PanAm-Unsat 2021: 3rd Pan-American*

Conference on Unsaturated Soils. **337**, 03004.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/202133703004>

- Torrico, J.A., Miranda, S., Cornellis, W., Rojas, J.C., Di Emidio, G., & Bezuijen, A. (2020). Medición del incremento de esfuerzos verticales generados por un vehículo en una arena limosa. *Ingenium*. **1**, 123-128.
- López, R. (2020). Prevention of soil compaction by agricultural operations: a geotechnical perspective. Master Thesis. **Ghent University**, Faculty of Engineering and Architecture. Ghent, Belgium.
- Söhne, W. (1958). Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres. *Agricultural Engineering*. **39**, 276-281 290.
- Torrico, J.A., Miranda, S., Cornellis, W., Rojas, J.C., Di Emidio, G., & Bezuijen, A. (2021). Efecto de la succión matricial en la distribución de esfuerzos verticales generados por el paso de un vehículo en una arena limosa bajo diferentes condiciones ambientales. *Ingenium*. **2**, 15-21.
- Lamandé, M., Keller, T., Berisso, F., Stettler, M., and Schjfnning, P. (2015). Accuracy of soil stress measurements as affected by transducer dimensions and shape. *Soil Till. Res.* **145**, 72-77, doi: *10.1016/j.still.2014.08.011*.