

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

Torrigo, J.A.^a, Di Emidio, G.^b, Cornellis, W.^c, Rojas, J.C.^d, Bezuijen, A.^e

- 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.TorrigoBravo@UGent.be
- b Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de ingeniería civil. E-mail: Gemmina.DiEmidio@ugent.be.
- c Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de Biociencias, Universidad de Gante. E-mail: Wim.Cornelis@ugent.be.
- d 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.
- e Director del laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Gante, Universidad de Gante. E-mail: Adam.Bezuijen@ugent.be.

Recibido: 03/10/2022

Aceptado: 10/10/2022

Publicado: 10/11/2022

RESUMEN

El presente artículo estudia el efecto de la presión de inflado aplicada a los neumáticos, tanto delantero como trasero, sobre los esfuerzos verticales a diversas profundidades, que han surgido por el paso de un tractor sobre tres perfiles de suelo, todos constituidos por un limo arenoso de baja plasticidad (ML). Para registrar los incrementos en los esfuerzos verticales, se instalaron tres células de carga de compresión pequeñas (16,5 mm de diámetro) en posición paralela a la superficie del suelo, a tres profundidades diferentes (15 cm, 30 cm y 45 cm) y bajo la línea central de la trayectoria de las ruedas del lado derecho de un tractor agrícola. La presión de inflado de los neumáticos ha variado desde la recomendada hasta la máxima permitida por el fabricante. Se ha tenido cuidado de calibrar las células de carga en condiciones de campo antes de las pruebas. Las tensiones verticales medidas en campo han sido validadas utilizando el software Terranimo y la solución analítica de Söhne. Como el modelo Terranimo necesita a la succión matricial como dato de entrada, se han instalado tensiómetros jet fill a las mismas profundidades que las células de carga. Los resultados obtenidos han demostrado que, a la profundidad de 15 cm, el incremento de la presión de inflado de los neumáticos tiene influencia en el incremento de los esfuerzos verticales. A las profundidades de 30 cm y 45 cm, el incremento de la presión de inflado no ha tenido mucha influencia sobre el incremento de los esfuerzos verticales.

Palabras clave: Presión de inflado, células de carga, incremento de esfuerzo vertical, perfil de suelo.

ABSTRACT

This research studies the tire inflation pressure effect, applied to front and rear wheel, on the vertical stresses due to the passage of an agricultural machinery over three soil tests fields at three depths (15 cm, 30 cm and 45 cm), all of them constituted by a sandy silt of low plasticity (ML). To register the increase in vertical stress, three small compression load cells (16.5 mm diameter) were installed parallel to the ground surface, at the three specified depths and under the centerline of the path of the right side wheels of the machinery. Tire inflation pressure variation has ranged between the recommended and maximum allowed by the manufacturer. Care has been taken in order to calibrate the load cells under field conditions before the wheeling events. Measurements of vertical stresses with loads cells have been validated using Terranimo software and Söhne analytical solution. As Terranimo model requires matric suction as input data, jet fill tensiometers have been installed at the same depths as the load cells. Results obtained showed, at 15 cm depth, a marked increase in vertical stresses caused by the increase in tire inflation pressure. At depths of 30 cm and 45 cm, the increasing inflation pressure does not have a great influence on increase in vertical stresses.

Key words: Tire pressure, load cells, increase of vertical stress, soil profile.

INTRODUCCIÓN

La bibliografía existente sobre compactación de suelos es extensa. Sin embargo, existe documentación más escasa referente a la cadena de causa y efecto para que un perfil de suelo alcance su estado plástico por el paso de maquinaria (Lamandé, 2011). Un ejemplo de ésta cadena es el efecto sobre estos esfuerzos verticales, generados en el perfil de suelo, que puede tener la correcta elección de una presión de inflado para los neumáticos trasero/delantero de un tractor (Damme et. al., 2019).

El propósito del presente artículo es el de analizar el efecto de la presión de inflado en el incremento de esfuerzos verticales de un suelo, causados por el paso de los neumáticos de un tractor. Esto, variando la presión de inflado a partir de la presión recomendada por el fabricante. Bajo ésta premisa, los objetivos del presente estudio son:

- Realizar una medición “in situ” del incremento de los esfuerzos verticales en un perfil de suelo a las profundidades de 15 cm, 30 cm y 45 cm, debajo de los neumáticos delantero y trasero de un tractor agrícola. Para éste trabajo de campo, se cuenta con células de carga de compresión de tecnología italiana.
- Repetir la medición para tres presiones de inflado de los neumáticos, tanto trasero como delantero. Para este cometido se cuenta con un compresor de aire portátil que permitirá variar la presión del neumático en campo.
- Repetir esta operación, de medir y variar presión de inflado, en tres perfiles de suelo.
- Validar las mediciones “in situ” de los esfuerzos verticales, mediante el software TERRANIMO (López, 2020), y la solución analítica de Söhne (Söhne, 1958), para una carga circular.
- Medir la succión matricial en cada perfil de suelo, a las mismas profundidades de análisis que los esfuerzos verticales y para cada variación de la presión de inflado.
- Analizar el efecto de variar la presión de inflado de los neumáticos, respecto al incremento de los esfuerzos verticales en el momento del paso de los neumáticos del tractor agrícola en los tres perfiles de suelo seleccionados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de experimentación y maquinaria

Los tres terrenos de estudio, que en adelante se denominarán como suelo S1 (19°10'17.88" S, 64°53'54.28" W), suelo S2 (19°10'15.94" S, 64°53'52.69" W) y suelo S3 (19°10'5.65" S, 64°53'52.69" W), se encuentran localizados en la localidad de Tarabuco, Chuquisaca (Figura 1)



Figura 1. Ubicación de los terrenos de estudio (círculo amarillo S1, rojo S2 y verde S3).

En cuanto a la caracterización, Los tres perfiles de suelo se encuentran constituidos por un limo arenoso de baja plasticidad (ML), de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Das, 2013). En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 1. Caracterización del suelo.

Perfil de suelo	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	(g/cm ³)	Gs	Sucs	Contenido orgánico (%)
S1	8	48	44	1,70	2,64	ML	0,52
S2	10	52	38	1,72	2,65	ML	0,45
S3	8	50	42	1,67	2,65	ML	0,45

La maquinaria empleada en los ensayos es un tractor agrícola JOHN DEERE modelo 6110D, con un tipo de neumático 13.6R24 en la rueda delantera, 18.4R34 en la rueda trasera. Para ambos neumáticos se cuenta con una presión de inflado recomendada de 12 PSI (DEERE & COMPANY, 2008). En la Tabla 2 se muestra las presiones de inflado que se han utilizado en el presente estudio.

Tabla 2. Variación de la presión de inflado.

Tipo de Neumático	Presiones de inflado utilizadas		
	recomendada (PSI)	intermedia (PSI)	máxima (PSI)
13.6R24	12	20	28
18.4R34	12	16	20

El criterio empleado para variar la presión de inflado fue de no exceder la presión máxima permitida por el fabricante de neumáticos (Firestone, 2020). Es por este motivo que se ha variado desde la presión recomendada hasta la presión máxima, pasando por una presión de inflado intermedia entre estas dos.

Mediciones “in situ” del incremento de los esfuerzos verticales

Se cuenta con células de carga de compresión de tecnología italiana (Torricco et. al., 2020), las cuales han sido

instaladas en cada uno de los tres perfiles de suelo a las profundidades de 15 cm, 30 cm y 45 cm, se ha tenido cuidado que la posición de las células coincida con el centro de la huella del neumático y que estén con la mayor proximidad a los tensiómetros jet fill.

En el presente estudio, la novedad es la variación en la presión de inflado de los neumáticos delantero y trasero. Para este propósito, se cuenta con un compresor de aire portátil, con el que se podrá cambiar la presión a las seis variaciones planteadas.

En cada variación de presión del neumático, y para cada uno de los tres terrenos de ensayo (perfiles de suelo), con la ayuda de hojas de papel, se ha tenido el cuidado de medir el área de contacto entre el neumático y el suelo.

Validación de las mediciones “in situ” del incremento de esfuerzos verticales

Con el propósito de validar las mediciones del incremento del esfuerzo vertical en las pruebas de campo que se han realizado para diferentes presiones de neumático en cada uno de los tres terrenos de ensayo, se han calculado los incrementos del esfuerzo vertical utilizando el software de Terranimo (López, 2020) y el modelo analítico de Söhne (Söhne, 1958) para cargas circulares.

Terranimo es un software de acceso libre que se encuentra en la web (www.terranimo.world), 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 (Figura 2). Es por este motivo que, en el presente estudio, se ha realizado el monitoreo de la succión matricial.

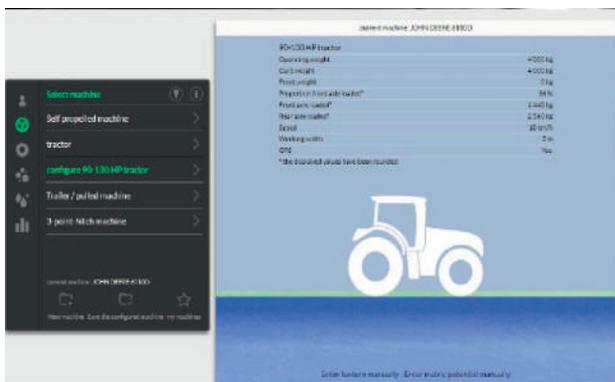


Figura 2. Interfaz del software Terranimo.

$$\sigma_z = \sum_{i=0}^{i=n} (\sigma_z)_i = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{vP_i}{2\pi z_i^2} \cos^{v+2}\theta_i \quad Eqn(1)$$

La ecuación 1 corresponde al modelo analítico de Söhne. Para mayores detalles de Eq. (1), se puede consultar la primera publicación de ésta revista (Torricono et. al., 2020).

Monitoreo de la succión matricial

Tensiómetros tipo red fill (Torricono et. al., 2020) han sido instalados en el terreno de prueba con la mayor proximidad a las células de carga, para medir la succión matricial “in situ”. El propósito, obtener el valor de la succión matricial para cada profundidad en el momento del paso de la rueda trasera izquierda del vehículo. Esta operación fue realizada para cada variación de la presión de inflado, en cada uno de los tres terrenos, a las profundidades establecidas de 15 cm, 30 cm y 45 cm. El monitoreo de la succión se ha realizado una vez por día (Torricono et. al., 2021).

Procedimiento de los ensayos de campo

Para la instalación de las tres células de carga, se ha seguido el procedimiento descrito originalmente por Lamandé et. al. (2011), explicado detalladamente en la primera publicación de ésta revista técnica (Torricono et. al., 2020). En el presente estudio se ha visto por conveniente proteger las tres células de carga debido a que, al insertarlas lateralmente por presión, éstas se dañan fácilmente. Se han construido protectores de acero (30 mm de ancho, 20 mm de altura y 60 mm de longitud) con un espacio (16.5 mm de diámetro y 5 mm de altura) para el encapsulamiento justo de cada célula de carga, dejándola libre solamente en su cara superior para que entre en contacto con el suelo circundante (Lamandé et. al., 2015). De esta manera se evita el daño de la célula y se asegura el contacto con el suelo (Lamandé et. al., 2011). En la figura 3 podemos ver los protectores de célula que se han fabricado.



Figura 3. Protectores de las células de carga.

En total se realizaron nueve ensayos en los tres terrenos (S1, S2 y S3), con los que se han registrado cincuenta y cuatro mediciones del incremento de esfuerzos verticales y nueve mediciones de la succión matricial.

RESULTADOS

Medición y validación del incremento de los esfuerzos verticales en el perfil de suelo

Las Figuras 4, 5 y 6 muestran los resultados de los incrementos de esfuerzos verticales que se han obtenido en la prueba de campo del suelo S1, con las variaciones de presión de inflado indicadas en la tabla 2. Los resultados mostrados corresponden a las mediciones realizadas con las células de carga, como también al modelo Terranimo (López, 2020) y a la solución analítica de Söhne (Söhne, 1958). En las tres figuras se puede apreciar que existe correlación entre mediciones y soluciones analíticas; son embargo, se nota cierta sobre estimación de las mediciones con células de carga para las tres profundidades.

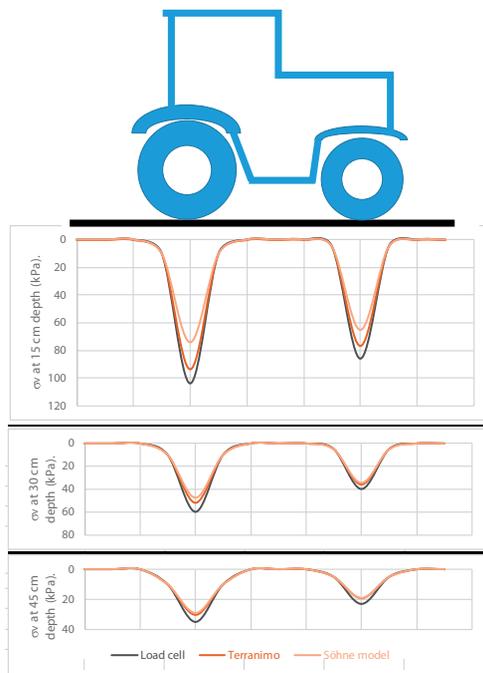


Figura 4. Suelo S1. Variación del incremento del esfuerzo vertical, neumáticos a presión 12 PSI. Comparación de mediciones (negro) con soluciones analíticas (café oscuro y claro).

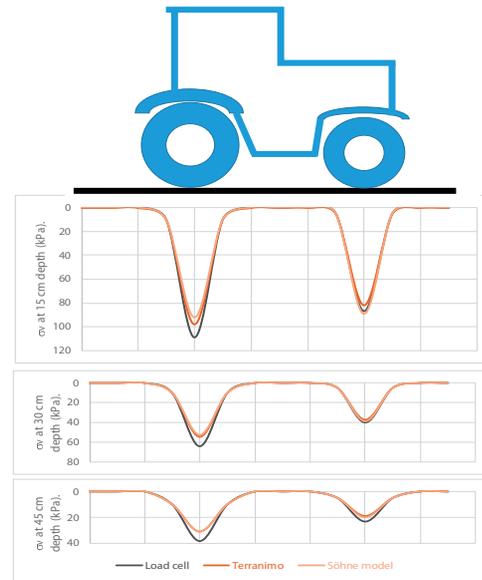


Figura 5. Suelo S1, neumáticos delanteros a presión 20 PSI y neumáticos traseros a presión 16 PSI. Comparación de mediciones (negro) con soluciones analíticas (café oscuro y claro).

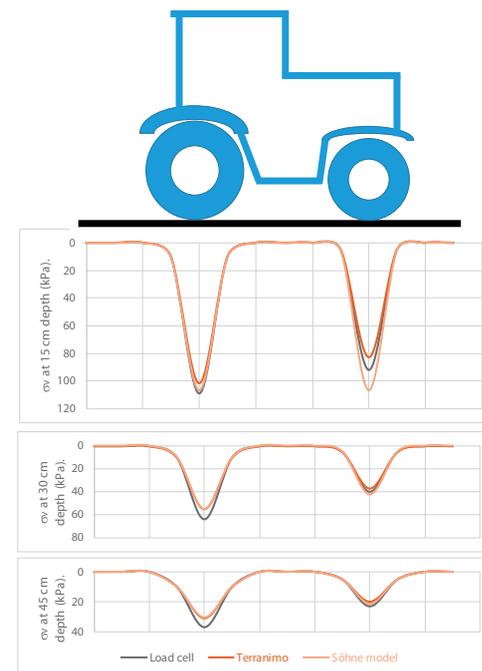


Figura 6. Suelo S1, neumáticos delanteros a presión 28 PSI y neumáticos traseros a presión 20 PSI. Comparación de mediciones (negro) con soluciones analíticas (café oscuro y claro).

Las Figuras 7, 8 y 9 muestran los resultados de los esfuerzos verticales que se han obtenido en la prueba de campo del suelo S2 con las variaciones de presión de inflado indicadas en la tabla 2. Se han obtenido resultados similares al suelo S1 y también se comprobado que existe

una correlación entre las mediciones con las células de carga y las soluciones analíticas. Comparando mediciones y soluciones analíticas, en la mayoría de los casos se cumple el mismo patrón del suelo S1, en el que las mediciones con células de carga proporcionan resultados sobre estimados con respecto a las soluciones analíticas. A la profundidad de 15 cm es donde se encuentra una mayor brecha entre mediciones y soluciones analíticas, para ambos neumáticos; mientras que a las profundidades de 30 cm y 45 cm esa brecha disminuye.

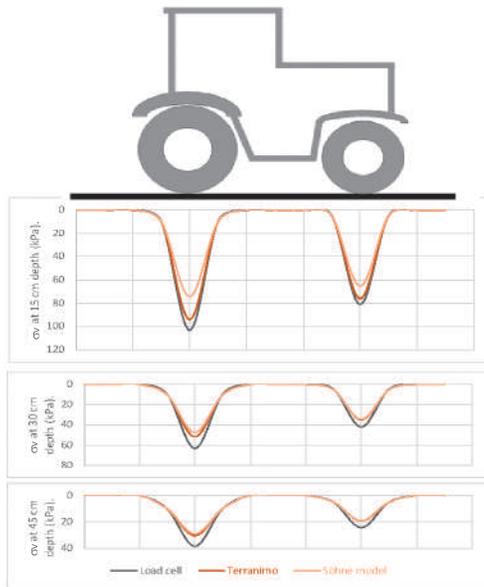


Figura 7. Suelo S2 Variación del incremento del esfuerzo vertical, neumáticos a presión 12 PSI.

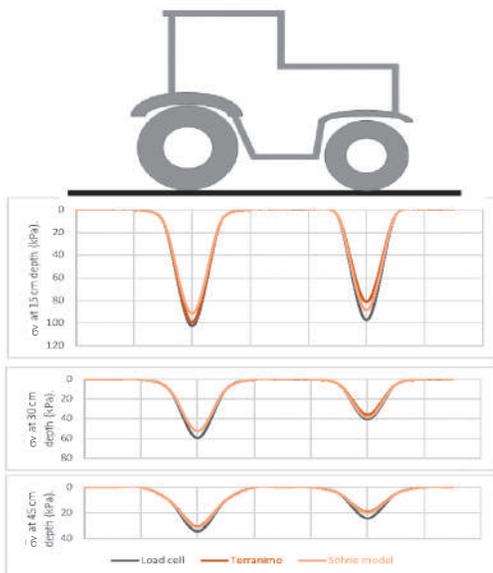


Figura 8. Suelo S2, neumáticos delanteros a presión 20 PSI y neumáticos traseros a presión 16 PSI. Comparación de mediciones (negro) con soluciones analíticas (café oscuro y claro).

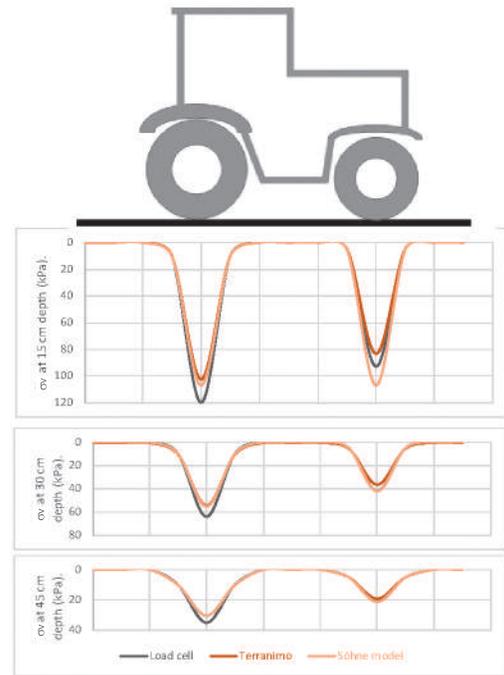


Figura 9. Suelo S3, neumáticos delanteros a presión 28 PSI y neumáticos traseros a presión 20 PSI. Comparación de mediciones (negro) con soluciones analíticas (café oscuro y claro).

Las Figuras 10, 11 y 12 muestran los resultados del incremento de los esfuerzos verticales que se han obtenido en la prueba de campo del perfil de suelo S3 con las variaciones de presión de inflado indicadas en la tabla 2. Se han obtenido resultados similares a los perfiles de suelo S1 y S2 en lo que respecta a valores de esfuerzos verticales, correlación entre mediciones y soluciones analíticas y a la profundidad de 15 cm, a la que existe una mayor diferencia entre mediciones y cálculos. Entonces, se ha conseguido una repetitividad de los resultados obtenidos en los tres perfiles de suelo ensayados en campo con el tractor agrícola John Deere 6110 D.

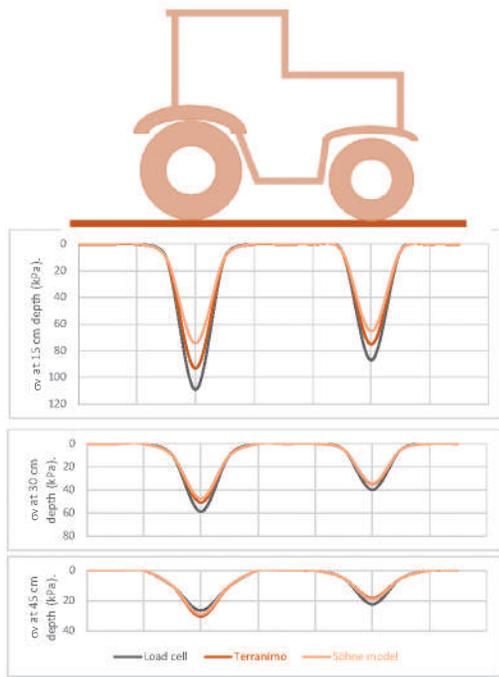


Figura 10. Variación del incremento del esfuerzo vertical en el Suelo S3, neumáticos a presión 12 PSI. Comparación de mediciones (línea de color negro) con soluciones analíticas (líneas de color café oscuro y claro).

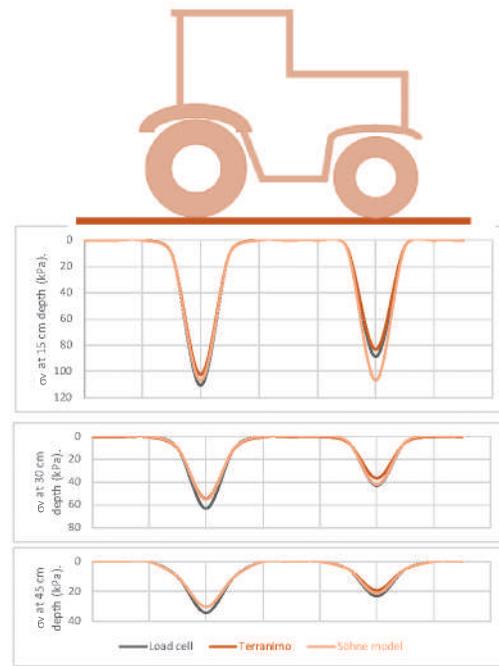


Figura 12. Suelo S3, neumáticos delanteros a presión 28 PSI y neumáticos traseros a presión 20 PSI. Comparación de mediciones (negro) con soluciones analíticas (café oscuro y claro).

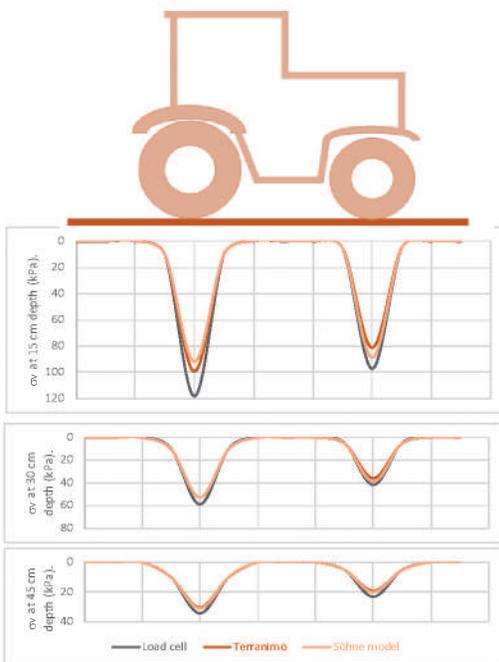


Figura 11. Suelo S3, neumáticos delanteros a presión 20 PSI y neumáticos traseros a presión 16 PSI. Comparación de mediciones (negro) con soluciones analíticas (café oscuro y claro).

Mediciones de la succión matricial

Para cada uno de los tres perfiles de suelo analizados, se ha monitoreado la succión matricial a 15 cm, 30 cm y 45 cm de profundidad. En las figuras 13, 14 y 15 se muestran los resultados del monitoreo a las tres profundidades. Es importante hacer notar que, en el momento de las pruebas de campo, después de variar la presión de inflado de los neumáticos de acuerdo a la Tabla 2 con el compresor de aire portátil, no se ha registrado variación alguna en la succión en el momento del paso del tractor agrícola, en cada una de las tres profundidades de estudio.

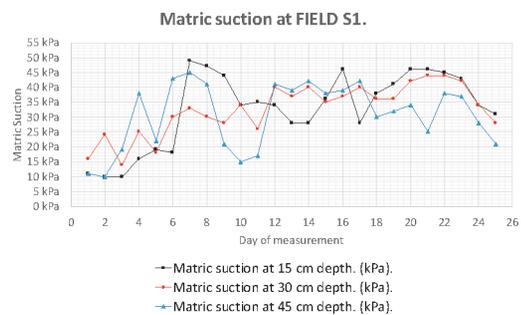


Figura 13. Suelo S1. Monitoreo de la succión matricial con tensiómetros jet fill a 15 cm, 30 cm y 45 cm de profundidad.

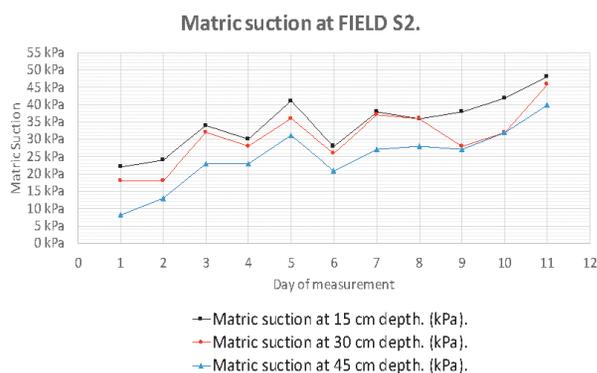


Figura 14. Suelo S2. Monitoreo de la succión matricial con tensiómetros jet fill a 15 cm, 30 cm y 45 cm de profundidad.

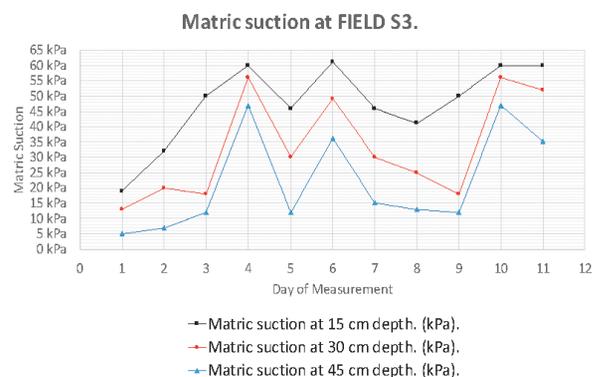


Figura 15. Suelo S3. Monitoreo de la succión matricial con tensiómetros jet fill a 15 cm, 30 cm y 45 cm de profundidad.

El registro de succiones matriciales que se muestra en la tabla 3, son valores que han sido extraídos de las figuras 13, 14 y 15, justo en el momento del paso del tractor agrícola a lo largo de las pruebas de campo realizadas en los tres perfiles de suelo.

Tabla 3. Succión matricial registrada en las pruebas de campo con el tractor agrícola.

No	Perfil de suelo	Succión Matricial (kPa)		
		15 cm	30 cm	45 cm
1	S1	38	33	30
2	S2	48	43	40
3	S3	60	52	35

Los resultados registrados en la tabla 3, así como los de las Tablas 1 y 2, han servido como datos de entrada en el software Terranimo para obtener los valores de incremento de esfuerzos verticales que se encuentran tabulados en las Figuras 4 a la 12.

Efecto de la presión de inflado en el incremento de los esfuerzos verticales

Para analizar el efecto de la presión de inflado en los esfuerzos verticales, se ha tomado en cuenta mediciones y soluciones analíticas y se ha obtenido un promedio de estos valores para cada profundidad, perfil de suelo y presión de inflado. En las Tablas 4, 5 y 6 se resumen los incrementos de esfuerzos verticales promedio por profundidad de análisis, para cada perfil de suelo, presión de inflado y tipo de rueda.

Tabla 4. Variación del incremento de esfuerzos verticales a 15 cm de profundidad.

Tyre pressure applied (PSI)	15 cm depth							
	Rear wheel	Front wheel	Rear wheel			Front wheel		
			σ_v mean (kPa)			σ_v mean (kPa)		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	
12	12	91	90	92	76	74	76	
16	20	100	98	103	86	89	89	
20	28	106	110	107	94	94	93	

Se ha elegido diferenciar las tablas por profundidad debido a que, de esta manera es más fácil notar el efecto de la presión de inflado en los esfuerzos verticales generados en cada perfil de suelo, en particular a la profundidad de 15 cm (tabla 4). A esta profundidad, el hecho de incrementar la presión de inflado, desde la presión recomendada hasta la máxima permitida, ha generado un incremento máximo de 20 kPa (en el perfil de suelo S2), que significa un incremento del 22% del esfuerzo vertical a la presión de inflado recomendada, tal y como se muestra en la tabla 4.

Tabla 5. Variación del incremento de esfuerzos verticales a 30 cm de profundidad.

Tyre pressure applied (PSI)	30 cm depth							
	Rear wheel	Front wheel	Rear wheel			Front wheel		
			σ_v mean (kPa)			σ_v mean (kPa)		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	
12	12	53	54	52	37	37	39	
16	20	57	55	55	39	39	39	
20	28	58	58	57	40	40	40	

En las Tablas 5 y 6 se puede observar que, a las profundidades de 30 cm y 45 cm el efecto de la presión de inflado en el incremento de los esfuerzos verticales es mínimo, registrando un máximo de 5 kPa (en el perfil de suelo S1) a 30 cm de profundidad y de 3 kPa (en el perfil de suelo S3) a 45 cm de profundidad; lo que significa un incremento del esfuerzo vertical, respecto a presión de inflado recomendada, del 9% en ambas profundidades.

Tabla 6. Esfuerzos verticales promedio a 45 cm de profundidad.

Tyre pressure applied (PSI)		45 cm depth					
		Rear wheel			Front wheel		
Rear wheel	Front wheel	σ_v mean (kPa)			σ_v mean (kPa)		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3
12	12	31	32	28	20	21	20
16	20	33	32	32	21	21	21
20	28	33	32	31	21	20	21

Finalmente, en las figuras 16, 17 y 18 se muestra de una manera gráfica el efecto de la presión de inflado de los neumáticos en el incremento de los esfuerzos verticales a las tres profundidades predeterminadas y para los tres perfiles de suelo.

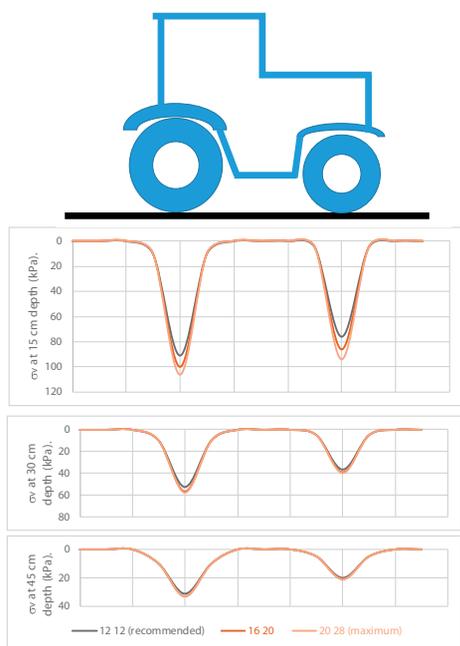


Figura 16. Suelo S1, Efecto de la presión de inflado en el incremento de los esfuerzos verticales. Presión recomendada (línea negra), presión intermedia (línea café) y presión máxima (línea café claro).

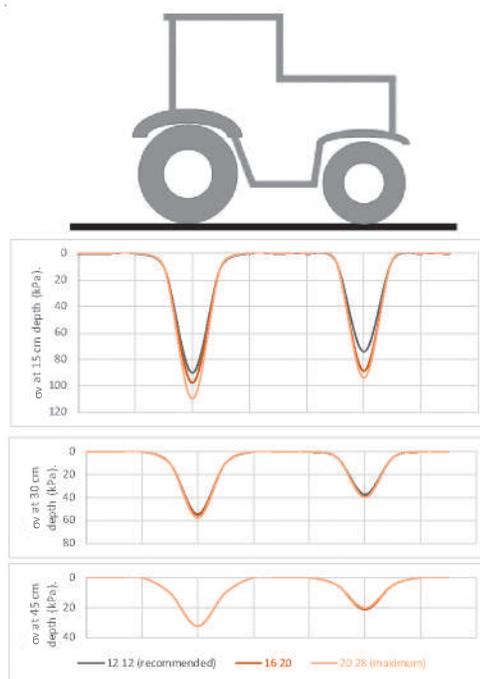


Figura 17. Suelo S2, Efecto de la presión de inflado de neumáticos en el incremento de σ_v

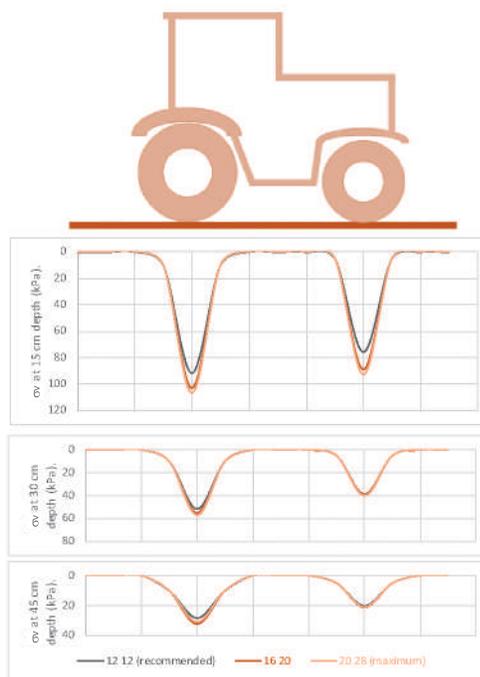


Figura 18. Suelo S3, Efecto de la presión en σ_v

CONCLUSIONES

La presente investigación concluye que, existe un efecto de la presión de inflado de los neumáticos en el incremento del esfuerzo vertical, particularmente a la profundidad de 15 cm.

Con un incremento de la presión de inflado en los neumáticos, se ha generado un incremento del esfuerzo vertical a las tres profundidades de estudio. El mayor incremento de esfuerzo vertical registrado, debido al incremento de la presión de inflado, ha sido de 22 % a la profundidad de 15 cm. A las profundidades de 30 cm y 45 cm, el incremento del esfuerzo vertical ha existido, pero mucho menor (9 %).

Comparando las mediciones del incremento de los esfuerzos verticales, registradas con las células de carga, y los cálculos obtenidos utilizando el software de Terranimo y la solución analítica de Söhne, podemos ver que existe una correlación; además, a mayor profundidad de análisis, el esfuerzo vertical disminuye. Sin embargo, en la mayoría de las mediciones de campo, las células de carga han arrojado los mayores valores con una sobre estimación máxima de 18.5 % (suelo S3) respecto a las soluciones analíticas. Esta sobre estimación en la medición del incremento de esfuerzos verticales con las células de carga puede atribuirse a la rigidez de su protector, el cual es de acero.

Los resultados obtenidos en cada uno de los tres perfiles de suelo que se han ensayado en campo, a las seis presiones de inflado de neumáticos (delantero y trasero) definidas y a las tres profundidades predeterminadas, proporcionaron resultados similares del incremento de esfuerzos verticales, de manera que se ha generado una repetitividad de los resultados.

Para futuras investigaciones, de acuerdo con el diseño experimental de nuestro estudio de doctorado, se tiene planificado realizar el mismo procedimiento experimental, pero ahora en condiciones saturadas, es decir después de una lluvia y comparar ambos estudios; también se tienen planificado realizar ensayos de presión de consolidación para verificar si los estados tensionales generados con el paso del vehículo, provocan que el perfil de suelo analizado permanezca en estado elástico o ingrese en un estado plástico.

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

- 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1016/j.still.2014.08.011).
- Das, B. M. (2013). Fundamentals of Geotechnical Engineering 4th Edition. Cengage Learning. **ISBN 978-1-111-5765-2**.

