



Effect of Vibrations and Operational Parameters in Frequency and Amplitude of a Vibratory Subsoiler

Efecto de las vibraciones y parámetros de operación en la frecuencia y amplitud de un subsolador vibratorio

MSc. Luis Orlando Marín-Cabrera, Dr.C. Armando Eloy García de la Figal-Costales, Dr.Cs. Arturo Martínez-Rodríguez
Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

ABSTRACT. This paper aims to analyze the effect of free and forced vibrations and of working depth on the frequency and amplitude of a vibratory curved bent leg subsoiler plowing a silt loam soil (Rhodic Ferralsol) by the modal analysis of the soil-bent leg system. The finite elements method and the design software *Solid Works* with its complement *Simulation* were used to model and to simulate, the bent leg scarifier soil interaction. The soil was considered as homogeneous and elastoplastic of Drucker-Prager extended constitutive relation. The results showed the significant effect of the work depth on the frequencies and amplitude of the soil when the vibratory system works with free vibrations. When forced vibrations were used to different work depths, significant differences were not observed in frequencies neither of the bent leg nor of the soil. On the other hand, the resonant frequencies of the shank obtained corresponding to the two first vibration modes (2,20; 8,47 and 13,35 Hz) at a working depth of 200 mm allowed a better loosening of the soil.

Keywords: Subsoiler, Free Vibrations, Forced Vibrations, Working Depth.

RESUMEN. Para analizar el efecto de las vibraciones libres y forzadas y la profundidad de trabajo en la frecuencia y amplitud de las vibraciones de una herramienta de labranza (subsolador vibratorio de brazo curvo) cultivando un suelo arcilloso limoso (Rhodic Ferralsol) mediante un análisis modal del sistema brazo-suelo, se simuló la interacción suelo-herramienta de labranza, mediante el método de elementos finitos y el software de diseño *Solid Works*, con su complemento *Simulation*, considerando el suelo homogéneo y elastoplástico de relación constitutiva Drucker-Prager Extendido. Los resultados mostraron el efecto significativo de la profundidad de trabajo en las frecuencias y amplitud del suelo cuando el sistema vibratorio trabaja con vibraciones libres, mientras que con vibraciones forzadas no se observaron diferencias significativas en las frecuencias tanto del brazo como del suelo. Por otra parte, las frecuencias resonantes del brazo obtenidas correspondientes a los dos primeros modos de vibración (2,20; 8,47 y 13,35 Hz) a una profundidad de operación de 200 mm permiten un mejor aflojamiento del suelo.

Palabras clave: subsolador, vibraciones libres, vibraciones forzadas, profundidad de trabajo.

INTRODUCTION

The mechanical manipulation of the soil is made by the using of farming tools or implements, which make to soil appropriate for the growth and development of plants (Ani et al., 2014; Prem et al., 2016). It is well known that the vibrations of tractive farming tools (knives, chisels, etc.), reduce the necessary force for their movement through the

INTRODUCCIÓN

La manipulación mecánica del suelo es realizada mediante la utilización de aperos con herramientas de cultivo, los cuales hacen al suelo adecuado para el crecimiento de las plantas y su desarrollo (Ani et al., 2014; Prem et al., 2016). Es conocido que las vibraciones de las herramientas de labranza tractivas (cuchillas, cinceles, etc.), reducen la fuerza necesaria para su movimiento a través del suelo,

¹ Author for correspondence: Luis Orlando Marín-Cabrera, email: luismc@unah.edu.cu

Received: 15/09/2020.

Approved: 01/03/2021.

soil, which is highly desirable for the implements that require to diminish draft force like subsoiler and produce better break of the soil, although the total requirements of power cannot be reduced (Larson, 1967; Smith *et al.*, 1972). The tillage tool vibrations were presented in 1955 by Gunn and Tramontini cited by Rao *et al.* (2018). With the draft force reduction by means of the use of vibratory tools, it is possible to carry out operations of deep farming like subsoiling, with tractors of little tractive class and to achieve smaller compaction of the soil (Bandalan *et al.*, 1999), with more efficiency in its crumbling (Rao *et al.*, 2018). These tools oscillate longitudinally or transversely, with frequencies of 2 to 14 Hz and amplitudes of 1,6 to 9,6 mm (Luna & González, 2002), along the direction of movement advance, that can be linear or curve, regarding the reference system of the implement, and the vibration way can be longitudinal or transverse. The oscillation plane can be vertical, horizontal or to have some inclination in the three-dimensional space (Rao & Chaudhary, 2018).

Investigations related with the use of vibratory tools have been developed by Shkurenko (1966), Sulatisky & Ukrainetz (1972), Butson & MacIntyre (1981), Zhang (1997), Bandalan *et al.* (1999), Karoonboonyanan *et al.* (2007) and Shahgoli *et al.* (2010). All these studies had the objective of determining the optimum vibration modes, operational and geometric parameters, as well as the required power and their effect in the magnitude of the necessary draft forces for breaking the soil.

Shkurenko (1960) carried out experiments with the bent leg oscillations in horizontal and vertical direction, frequencies of 100 and 210 Hz and 0.3 m. s⁻¹ of forward speed. The draft force diminished from 50 to 60% when the width increased from 0 to 10 mm. Butson & MacIntyre (1981) 1981 carried out experiments to oscillation frequencies bigger than 50 Hz and widths of 8 mm, with forward speeds from 0.54 to 1.98 km. h⁻¹. The draft force diminished above 50%, but the total consumption of power increased. However, Sulatisky & Ukrainetz (1972) reported that, reduction of the draft force as high as 80%, was achieved when the tool vibrated to frequencies higher than 30 Hz and widths bigger than 12 mm.

Bandalan *et al.* (1999) carried out experiments in a vibratory subsoiler of vertical right arm and plough share with lift angle of 30° and working width of 70 mm, tilling a compacted soil, with oscillation frequencies of 3,7; 5,67; 7,85; 9,48 and 11,45 Hz; widths of 18; 21; 23,5; 34 and 36,5 mm and forward speeds of 1,85; 2,20 and 3,42 km.h⁻¹. The vibratory system diminished the traction force 0,33% and the consumption energy increased 1,24% regarding the system without vibrating. The subsoiler could not work to frequencies smaller than 5 Hz (resonance of the tool). However, Shahgoli *et al.* (2010) carried out experiments with vibratory subsoiler of two arms and cam mechanism, with right and curved plough share in loam-sandy soil oscillating with amplitude of ± 69 mm; oscillation angle 27°; forward speed of 3 km.h⁻¹ and oscillation frequency of 1,9 to 8,8 Hz. They concluded that with frequencies near 3,3 Hz and forward speed of 1,5 km.h⁻¹, the draft force diminished 26% compared with the rigid one.

lo cual es altamente deseable para los implementos que requieren alta fuerza de tracción como los subsoladores y producen mejor falla y mullido del prisma de suelo del suelo, aunque los requerimientos totales de potencia pueden no ser reducidos (Larson, 1967; Smith *et al.*, 1972). Las oscilaciones de los implementos de cultivo fueron presentadas en 1955 por Gunn y Tramontini citado por Rao *et al.* (2018). Con la reducción de la fuerza de tracción mediante el uso de herramientas vibratorias, es posible realizar operaciones de labranza profunda (subsulado) con tractores de menor clase traccional y lograr menor compactación de los suelos según Bandalan *et al.* (1999) con mayor eficiencia en su desmenuzamiento (Rao *et al.*, 2018). Estas herramientas oscilan longitudinal o transversalmente, con frecuencias de 2 a 14 Hz y amplitudes de 1,6 a 9,6 mm según Luna y González (2002), a lo largo de la dirección de movimiento de avance, las cuales puede ser lineales o en forma curva respecto al sistema de referencia del apero. El plano de oscilación puede estar en forma vertical, horizontal o tener alguna inclinación en el espacio tridimensional (Rao y Chaudhary, 2018).

Investigaciones relacionadas con la utilización de herramientas vibratorias han sido desarrolladas por Shkurenko (1966); Sulatisky y Ukrainetz (1972); Butson y MacIntyre (1981); Zhang (1997); Bandalan *et al.* (1999); Karoonboonyanan *et al.* (2007); Shahgoli *et al.* (2010). Todos estos estudios han tenido el objetivo de determinar los regímenes óptimos de vibración, los parámetros de operación, los parámetros geométricos, así como la potencia requerida y su efecto en la magnitud de las fuerzas de tracción necesarias para el rompimiento del suelo.

Shkurenko (1960) realizó experimentos con oscilaciones del brazo en dirección horizontal y vertical, frecuencias de 100 y 210 Hz y velocidad de 0.3 m.s⁻¹. La fuerza de tracción disminuyó de 50 a 60% cuando aumentó la amplitud de 0 a 10 mm. Butson y MacIntyre (1981) 1981 realizaron experimentos a frecuencias de oscilación mayores de 50 Hz y amplitudes superiores a 8 mm, con velocidades de avance de 0.54 a 1.98 km. h⁻¹. La fuerza de tracción disminuyó por encima del 50%, pero aumentó el consumo total de potencia. Sin embargo, Sulatisky y Ukrainetz (1972) reportaron que, reducción de la fuerza de tracción tan alta como 80%, se logró cuando la herramienta vibró a frecuencias superiores a 30 Hz y amplitudes mayores de 12 mm.

Bandalan *et al.* (1999) realizaron experimentos en un subsolador vibratorio de brazo recto vertical y reja con ángulo de inclinación de 30° y ancho de trabajo 70 mm, labrando un suelo compactado, con frecuencias de oscilación de 3,7; 5,67; 7,85; 9,48 y 11,45 Hz; amplitudes de 18; 21; 23,5; 34 y 36,5 mm y velocidades de avance de 1,85; 2,20 y 3,42 km.h⁻¹. El sistema vibratorio disminuyó la fuerza de tracción 0,33% y aumentó el consumo energético 1,24% respecto al sistema sin vibrar. El subsolador no pudo trabajar a frecuencias menores de 5 Hz (resonancia de la herramienta). Sin embargo, Shahgoli *et al.* (2010) realizaron experimentos con subsolador vibratorio de dos brazos y mecanismo de levas, con rejas rectas y curvas en suelo limo-arenoso oscilando con amplitud de ± 69 mm; ángulo de oscilación 27°; velocidad de avance de 3 km.h⁻¹ y frecuencia de oscilación de 1,9 a 8,8 Hz. Concluyeron que, con frecuencia cercana a los 3,3 Hz y velocidad de 1,5 km.h⁻¹, la fuerza de tracción disminuyó en 26% comparada con el rígido.

The general objective of this study was to carry out a modal analysis of the soil-vibratory tool interaction by means of a simulation model with the finite elements method to determine the vibration modes and their specific frequencies (resonant) and to select the most appropriate ones for the operation of the system, as well as the effect of the work depth in the frequency and amplitude of vibrations.

MATERIAL AND METHODS

Model for Soil

The soil was modeled as continuous, homogeneous and elastoplastic, using the linear form of the extended Drucker-Prager model (Figure 1), utilized with success by Herrera *et al.* (2008a, 2008b), given the simplicity of it and the little quantity of necessary parameters for its implementation (González *et al.*, 2014).

El objetivo general de este estudio es determinar los modos de vibración y las frecuencias propias (resonantes) de un subsolador vibratorio (tanto para vibraciones libres como forzadas), labrando un suelo arcilloso-limoso y seleccionar los más adecuados para el funcionamiento del sistema, mediante el análisis modal de la interacción suelo-herramienta de labranza vibratoria, utilizando un modelo de simulación por el método de elementos finitos, así como el efecto de la profundidad de trabajo en la frecuencia y amplitud de las vibraciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo para el suelo

El suelo fue modelado como continuo, homogéneo y elastoplástico, utilizando la forma lineal del modelo de Drucker-Prager extendido (Fig. 1), empleado con éxito por Herrera *et al.* (2008a, 2008b), dada la sencillez del mismo y la poca cantidad de parámetros necesarios para su uso (González *et al.*, 2014).

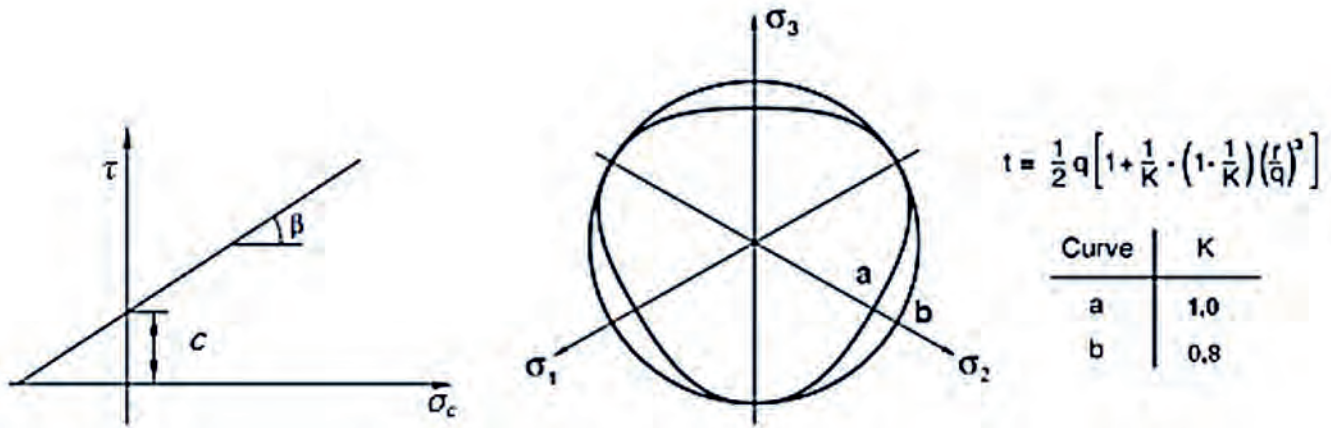


FIGURE 1. Extended linear Drucker-Prager model: a) meridional plane b) Main stresses plane.
 FIGURA 1. Criterio de fluencia del modelo de Drucker Prager Extendido lineal: a) plano meridional b) plano de tensiones principales.

Properties and Soil Parameters

The soil taken as study object was classified as Rhodic Ferralsol (Hernández *et al.* (2015), with density of 1050 kg·m⁻³, plasticity index of 36.1% and matter content of 2.8%. The elasticity module (E) was determined as the slope of a tangent straight line to the curve effort-deformation in its right tract, obtained for this type of soil by De la Rosa *et al.* (2014). The values of the soil properties required by the simulation model in finite elements (Table 1) were obtained from García de la Figal (1978, 1991), Herrera *et al.* (2008a, 2008b) and De la Rosa *et al.* (2014).

The values of the properties and soil parameters required by the simulation model in finite elements are shown in the Table 1.

Propiedades y parámetros del suelo

El suelo tomado como objeto de estudio fue clasificado como Rhodic Ferralsol por Hernández *et al.* (2015), con una densidad de 1 050 kg·m⁻³, índice de plasticidad de 36,1% y contenido de materia orgánica 2,8%. El módulo de elasticidad E se determinó como la pendiente de una recta tangente a la curva esfuerzo-deformación en su tramo recto, obtenida para este tipo de suelo por De la Rosa *et al.* (2014). Los valores de las propiedades del suelo requeridas por el modelo de simulación en elementos finitos (Tabla 1) se obtuvieron sobre la base de los resultados de: García de la Figal (1978, 1991), Herrera *et al.* (2008a, 2008b); De la Rosa *et al.* (2014).

TABLE 1. Properties and soil parameters required by the FEM model
 TABLA 1. Propiedades y parámetros del suelo requeridos por el modelo FEM

Property or parameter	Symbol	Dimension
Friction internal angle	φ	5°
Modulus of elasticity	E	1575 kPa
Shear modulus	G	1793 kPa
Poisson's ratio	ν	0,22
Cohesion	c	15 kPa

Property or parameter	Symbol	Dimension
Soil humidity	Ha	27%
Density	γ	1.05 g.cm ⁻³
Shear resistance	τ	190 kPa
Shear modulus	G	1 793 kPa
Traction limit of soil	σ_t	20 kPa
Compression limit of soil	σ_c	480 kPa
Elastic limit of soil	σ_e	42 kPa
Soil-metal friction angle	δ	30.5°
Type of soil	Linear elastoplastic	

Simulation Model of the Interaction Soil-Vibratory Farming Tool

The model is composed by the subsoiler (with curved bent leg and logarithmic profile), the soil block, the vibrant mechanism and the interaction surfaces between both (Figure 2). The bent leg moves in the direction of the X axis to constant speed and working depth ae , vibrations frequency of the vibrating mechanism of 0.1 Hz and amplitude of 4 mm. It has angular movement freedoms in the vertex of the phase angle (θ) and linear in the X and Y axes. The lift angle (α) is 25° and the amplitude is 78 mm. The soil block has movement restrictions in lateral, posterior and inferior surfaces. Its dimensions are: length L (2 m), height H (0.9 m) and width B (1 m). The area of the tip surface is 0,0017 m² and of the attack surface 0,018 m². The width of the cut soil prism (b_0) coincides with the rake width. An increase of the dimensions of the soil prism, beyond those assigned, as a result of the interaction with the bent leg, can be rejected (Ibrahmi *et al.*, 2015; Marín & García de la Figal, 2019).

Modelo de simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza vibratoria

Lo componen el brazo curvo perfil logarítmico) del subsolador, el bloque de suelo, el mecanismo vibrador y las superficies de interacción entre ambos (Fig. 2). El brazo se desplaza en la dirección del eje X a velocidad constante y profundidad de trabajo ae , con frecuencia de las vibraciones del mecanismo vibrador de 0,1 Hz y amplitud 4 mm. Tiene libertades de movimiento angular en el vértice del ángulo de fase θ y lineal en los ejes X e Y. El ángulo de mullido de la reja $\alpha=25^\circ$ y ancho de trabajo $b_0=78$ mm y coincide con el ancho de la reja. El bloque de suelo tiene restricciones de movimiento por las superficies laterales, posterior e inferior. Sus dimensiones son: largo L=2 m; altura H=0,9 m y ancho B=1 m. El área de la superficie de la punta es 0,0017 m² y de la superficie de ataque 0,018 m². Un aumento de las dimensiones del prisma de suelo, más allá de las asignadas, como resultado de la interacción con el brazo, puede ser despreciado (Ibrahmi *et al.*, 2015; Marín y García de la Figal, 2019).

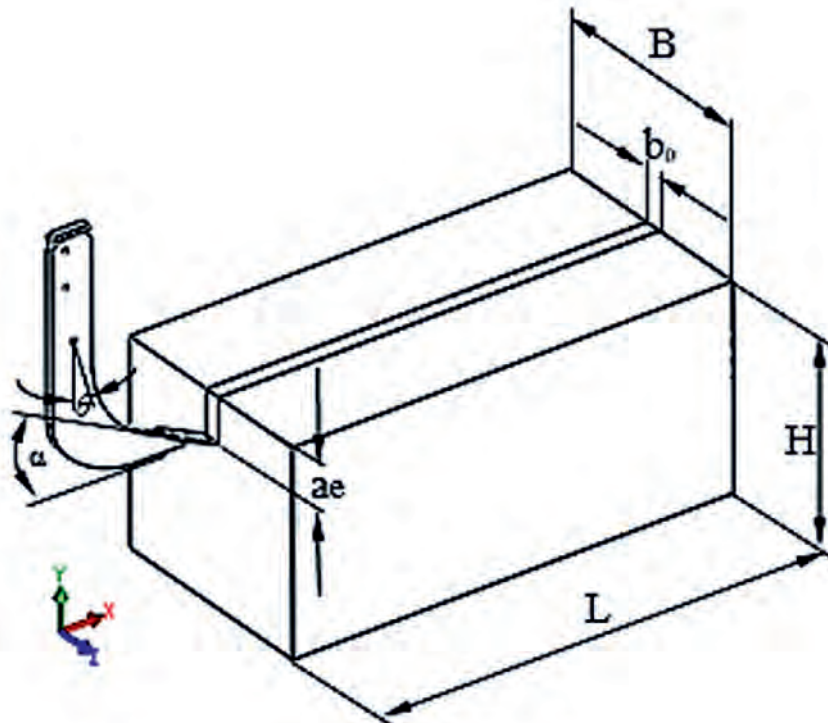


Figure 2. Tridimensional model of the system.
FIGURA 2. Modelo de simulación tridimensional del sistema.

The equation of the displacement (damped forced vibrations) is:

$$x(t) = X \times \text{sen}(\omega t - \theta) \quad (1)$$

where: X – amplitude of vibrations, mm; ω – frequency of vibrations, Hz

The speed is given by:

$$\dot{x} = X \times \omega \times \cos(\omega t - \theta) \quad (2)$$

The period of the vibration (T) is calculated by:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3)$$

The frequency of the vibrations is given by:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (4)$$

The natural frequency is calculated by:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

being: k – elastic constant of spring; m – spring mass;

The equation of displacement in the non-damped free vibratory movement is:

$$x(t) = X \text{sen}(\omega_n t + \varphi) \quad (6)$$

The speed equation is:

$$\dot{x}(t) = \omega_n X \cos(\omega_n t + \varphi) \quad (7)$$

For the modal analysis of the simulation model, three working depths (a_e) were used: 200, 300 and 400 mm and two vibration modes: free non-damped and forced damped. The forward speed was kept constant $Vm = 0,6 \text{ m.s}^{-1}$, the mesh density (size of elements) $a_e = 6 \text{ mm}$, with mesh control of the surfaces in contact, both the plough shares and the soil prism $e_{rp} = 4 \text{ mm}$ (Marín *et al.*, 2020).

RESULTS AND DISCUSSION

Bent leg Modal Analysis

The free non-damped and forced damped vibration modes were simulated. The first fifteen modal forms for both and their corresponding resonant frequencies (f_{nb}) were obtained and the two first vibration modes were the most appropriate for the operation of the bent leg (Table 2). With the natural frequencies obtained with free non-damped vibrations $f_{nbl} = 2,21, 13,35 \text{ Hz}$ and forced damped vibrations $f_{nbf} = 8,48 \text{ Hz}$, bigger soil crumbling was achieved as well as a diminishing of the draft force and power requirements. Similar frequencies of: 3,7, 5,67, 7,85 and 9,48 Hz, were employed by Bandalan *et al.* (1999) in field experiments with a vibratory subsoiler of simple arm and they obtained the highest values in reduction of the draft force in the longitudinal plane (0.33%) and power requirements (1.24%), with a frequency of 9,48 Hz, vibration amplitude of 36,5 mm and forward speed of 0,61 m.s^{-1} .

La ecuación del desplazamiento $x(t)$ para las vibraciones forzadas amortiguadas es:

$$x(t) = X \times \text{sen}(\omega t - \theta) \quad (1)$$

donde: X – amplitud de las vibraciones, mm; ω – frecuencia de las vibraciones, Hz

La velocidad x está dada por:

$$\dot{x} = X \times \omega \times \cos(\omega t - \theta) \quad (2)$$

El período de la vibración T se calcula por:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3)$$

La frecuencia de las vibraciones f está dada por:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (4)$$

La frecuencia natural se calcula como:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

siendo: k – constante elástica; m – masa.

La ecuación del desplazamiento en el movimiento vibratorio libre no amortiguado es:

$$x(t) = X \text{sen}(\omega_n t + \varphi) \quad (6)$$

La ecuación de la velocidad $x(t)$ viene dada por:

$$\dot{x}(t) = \omega_n X \cos(\omega_n t + \varphi) \quad (7)$$

Para el análisis modal del modelo de simulación se emplearon tres profundidades de trabajo $a_e = 200, 300$ y 400 mm y los dos regímenes de vibración: libre no amortiguado y forzado amortiguado. La velocidad de avance se mantuvo constante $Vm = 0,6 \text{ m.s}^{-1}$, la densidad de malla (tamaño de elementos) $e = 6 \text{ mm}$, con control de mallado de las superficies en contacto de la reja y el prisma de suelo de $e_{rp} = 4 \text{ mm}$ (Marín *et al.*, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis modal del brazo

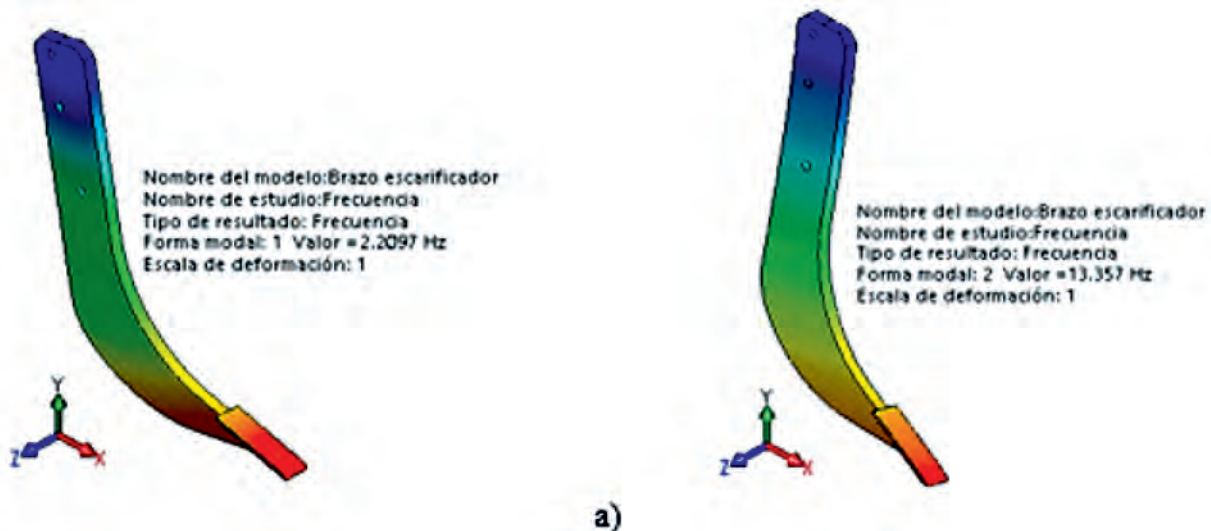
Se simularon los regímenes de vibración libre no amortiguado y forzado amortiguado, obteniéndose las quince primeras formas modales para ambos (Tabla 2) y sus correspondientes frecuencias resonantes (f_{nb}), siendo los dos primeros modos de vibración los más adecuados para el funcionamiento del brazo. Con las frecuencias naturales obtenidas con vibraciones libres no amortiguadas $f_{nbl} = 2,21, 13,35 \text{ Hz}$ y forzadas amortiguadas $f_{nbf} = 8,48 \text{ Hz}$, se logra mayor desmenuzamiento del suelo, disminución de la fuerza de tracción y requerimientos de potencia. Frecuencias similares de: 3,7, 5,67, 7,85 y 9,48 Hz, utilizaron Bandalan *et al.* (1999) en experimentos de campo con un subsolador vibratorio de brazo simple y obtuvieron los valores más altos de reducción de la fuerza de tracción en el plano longitudinal (0.33%) y requerimientos de potencia (1.24%), con una frecuencia de 9,48 Hz, amplitud de las vibraciones de 36,5 mm y velocidad de avance de 0,61 m.s^{-1} .

TABLE 2. Bent leg resonant frequencies: a) free non-damped vibrations b) Forced damped vibrations
TABLA 2. Frecuencias resonantes del brazo: a) vibraciones libres no amortiguadas b) vibraciones forzadas amortiguadas

a)				b)			
Mode	Frequency (rads)	Frequency (Hz)	Period (seg)	Mode	Frequency (rads)	Frequency (Hz)	Period (seg)
1	13.884	2.2097	0.45255	1	2.8767	0.45784	2.1842
2	83.924	13.357	0.074867	2	53.26	8.4767	0.11797
3	387.18	61.622	0.016228	3	184.46	29.357	0.034063
4	961.29	152.99	0.0065362	4	839.61	133.63	0.0074835
5	2078	330.72	0.0030237	5	1758.6	279.9	0.0035727
6	2181.5	347.19	0.0028802	6	1952.6	310.77	0.0032178
7	2526.2	402.06	0.0024872	7	2390.2	380.41	0.0026287
8	3844.1	611.82	0.0016345	8	3444.6	548.23	0.001824
9	4303.7	684.96	0.0014599	9	3730.6	593.74	0.0016842
10	4699.3	747.92	0.0013371	10	4234.1	673.89	0.0014839
11	5091.5	810.34	0.0012341	11	4437.2	706.19	0.001416
12	6006.5	955.97	0.0010461	12	5812.1	925.03	0.001081
13	6760.6	1076	0.0009293	13	6058.2	964.19	0.0010371
14	7542.5		0.000833	14	7159.4	1139.5	0.00087762
15	1200.4			15	7994.3	1272.3	0.00078596
15	8325.3	1325	0.0007547				

For the bent leg with free non-damped vibrations and the modal forms 1 and 2 (Figure 3a), the bent leg can work the soil without risks of the resonance effect, because the frequencies obtained in both modal forms allow its appropriate work. For the bent leg with forced damped vibrations (Figure 3b), the modal form 1 is near a resonant condition ($f_{nbf} = 0,45$ Hz), and that is why it is not the most appropriate for the operation of the vibratory system. The modal form 2 ($f_{nbf} = 8,47$ Hz) is the optimum. Similar results were obtained by Shahgoli et al. (2010), when they reached a reduction of the draft force of 26% to a frequency of 8,8 Hz in the longitudinal plane, amplitude of ± 69 mm, oscillation angle of 27° and forward speed of 0,83 m.s⁻¹. However, Luna & González (2002) affirm that the best results for vibratory subsoilers are obtained for frequencies of 80-100 rad. s⁻¹ (12-16 Hz) and amplitudes greater than 8 mm in a plane of vibrations (vertical), working depth between 300-400 mm and forward speeds between 0,56 and 1,4 m. s⁻¹.

Para el brazo con vibraciones libres no amortiguadas y las formas modales 1 y 2 (Fig. 3a), el brazo puede laborar el suelo sin riesgos del efecto de la resonancia, pues las frecuencias obtenidas en ambas formas modales permiten el trabajo adecuado del mismo. Para el brazo con vibraciones forzadas amortiguadas (Fig. 3b), la forma modal 1 se encuentra cerca de una condición resonante ($f_{nbf} = 0,45$ Hz), por lo que no es la más adecuada para el funcionamiento del sistema vibratorio. La forma modal 2 ($f_{nbf} = 8,47$ Hz) es la óptima. Resultados similares obtuvieron Shahgoli et al. (2010), cuando alcanzaron una reducción de la fuerza de tracción de 26% a una frecuencia de 8,8 Hz en el plano longitudinal, amplitud ± 69 mm, ángulo de oscilación 27° y velocidad de avance 0,83 m.s⁻¹. Sin embargo, Luna y González (2002) afirman que los mejores resultados para subsoladores vibratorios se obtienen para frecuencias de 80-100 rad/s (12-16 Hz) y amplitudes superiores a 8 mm en un plano de vibraciones (vertical), profundidad de trabajo entre 300-400 mm y velocidad de avance entre 0.56 y 1.4 m. s⁻¹.



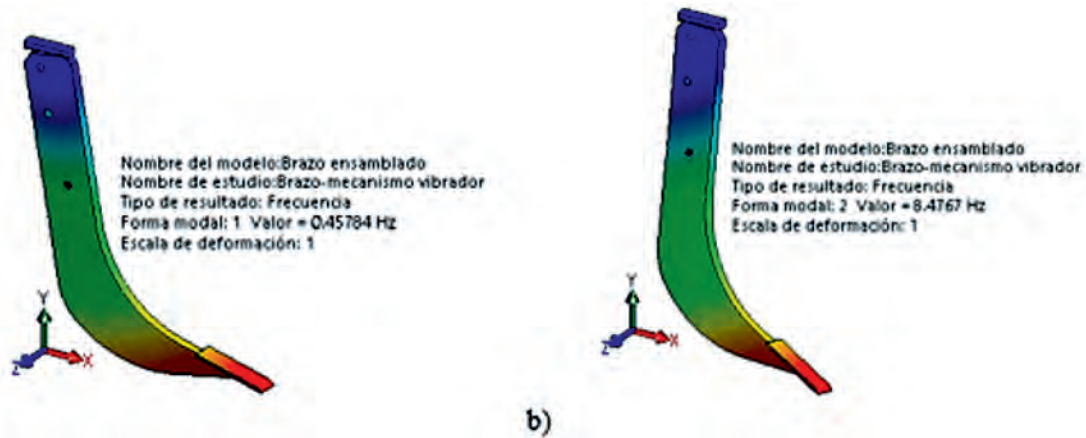


FIGURE 3. Resonant frequencies in the first two vibration modes: a) bent leg with free non-damped vibrations b) bent leg with forced damped vibrations.
 FIGURA 3. Frecuencias resonantes de los dos primeros modos de vibración: a) brazo con vibraciones libres no amortiguadas. b) brazo con vibraciones forzadas amortiguadas.

Modal Analysis of the Soil

The results of the frequency study carried out to the soil model to different working depths (Tables 3, 4 and 5) show that, to a depth $a_e = 200$ mm and the bent leg subsoiler with damped forced vibrations (Table 3b), the most appropriate values of soil natural frequencies are obtained for its loosening (2,63; 4,13; 8,15; 11,07 and 16,21 Hz).

Análisis modal del suelo

Los resultados del estudio de frecuencia realizado al modelo de suelo a diferentes profundidades de trabajo (Tablas 3, 4 y 5) muestran que, a una profundidad $a_e = 200$ mm y el brazo del subsolador con vibraciones forzadas amortiguadas (Tabla 3b) se obtienen los valores de frecuencias naturales del suelo más adecuados para su aflojamiento (2,63; 4,13; 8,15; 11,07 y 16,21 Hz).

TABLE 3. Resonant frequencies of the soil model ($a_e = 200$ mm)
TABLA 3. Frecuencias resonantes del modelo de suelo ($a_e = 200$ mm)

a)				b)			
Mode	Frequency (rads)	Frequency (Hz)	Period (seg)	Mode	Frequency (rads)	Frequency (Hz)	Period (seg)
1	0.021701	0.0034538	289.54	1	0.013164	0.0020951	477.31
2	579.97	92.305	0.010834	2	0.019076	0.0030361	329.37
3	637.24	101.42	0.00986	3	6.5912	1.049	0.95327
4	649.29	103.34	0.009677	4	16.546	2.6334	0.37974
5	701.2	111.6	0.0089606	5	26.004	4.1386	0.24163
6	777.49	123.74	0.0080814	6	51.241	8.1552	0.12262
7	790.38	125.79	0.0079496	7	69.592	11.076	0.090286
8	817.58	130.12	0.0076851	8	101.86	16.212	0.061684
9	828.63	131.88	0.0075826	9	129.7	20.642	0.048445
10	850.64	135.38	0.0073865	10	142.17	22.627	0.044196
11	867.48	138.06	0.007243	11	190.51	30.321	0.032981
12	873.4	139.01	0.0071939	12	234.96	37.395	0.026742
13	925.1	147.23	0.0067919	13	261.13	41.56	0.024062
14	935.75	148.93	0.0067146	14	298.42	47.495	0.021055
15	941.92	149.91	0.0066706	15	352.19	56.052	0.01784

TABLE 4. Resonant frequencies of the soil model ($a_e = 300$ mm)
TABLA 4. Frecuencias resonantes del modelo de suelo ($a_e = 300$ mm)

a)				b)			
Mode	Frequency (rads)	Frequency (Hz)	Period (seg)	Mode	Frequency (rads)	Frequency (Hz)	Period (seg)
1	516.25	82.163	0.012171	1	468.47	74.56	0.013412
2	583.26	92.829	0.010773	2	561.69	89.396	0.011186
3	606.84	96.581	0.010354	3	585.99	93.263	0.010722
4	691.38	110.04	0.0090879	4	667.4	106.22	0.0094144
5	749.66	119.31	0.0083813	5	720.82	114.72	0.0087167

Mode	Frequency (rads)	Frequency (Hz)	Period (seg)	Mode	Frequency (rads)	Frequency (Hz)	Period (seg)
6	762.34	121.33	0.008242	6	747.5	118.97	0.0084056
7	765.03	121.76	0.008213	7	758.99	120.8	0.0082784
8	776.87	123.64	0.0080878	8	766.79	122.04	0.0081941
9	789.33	125.63	0.0079601	9	785.55	125.02	0.0079985
10	839.71	133.64	0.0074826	10	836.73	133.17	0.0075093
11	857.04	136.4	0.0073313	11	837.85	133.35	0.0074992
12	859.91	136.86	0.0073068	12	850.02	135.28	0.0073918
13	870.26	138.51	0.0072199	13	863.44	137.42	0.0072769
14	919.53	146.35	0.006833	14	912.67	145.26	0.0068844
15	924.87	147.2	0.0067936	15	919.12	146.28	0.0068361

TABLE 5. Resonant frequencies of the soil model ($a_c = 400$ mm)
 TABLA 5. Frecuencias resonantes del modelo de suelo ($a_c = 400$ mm)

a) Free non-damped vibrations

Mode	Frequency (rads)	Frequency (Hz)	Period (seg)
1	551.09	87.709	0.011401
2	619.25	98.557	0.010146
3	646.92	102.96	0.0097125
4	734.29	116.87	0.0085569
5	797.82	126.98	0.0078755
6	807.18	128.47	0.0077841
7	817.29	130.08	0.0076879
8	827.74	131.74	0.0075908
9	837.04	133.22	0.0075064
10	878.84	139.87	0.0071494
11	883.54	140.62	0.0071114
12	910.39	144.89	0.0069016
13	928.34	147.75	0.0067682
14	968.19	154.09	0.0064896
15	986.92	157.07	0.0063665

b) Forced damped vibrations

Mode	Frequency (rads)	Frequency (Hz)	Period (seg)
1	477.05	75.925	0.013171
2	583.77	92.91	0.010763
3	615.04	97.886	0.010216
4	688.95	109.65	0.00912
5	732.64	116.6	0.0085761
6	762.12	121.3	0.0082443
7	771.35	122.76	0.0081457
8	773.12	123.05	0.0081271
9	794.03	126.37	0.0079131
10	844.92	134.47	0.0074364
11	857.07	136.41	0.007331
12	865.95	137.82	0.0072558
13	869.82	138.44	0.0072236
14	928.76	147.82	0.0067652
15	928.97	147.85	0.0067636

The Figure 4 shows the modal forms of the soil prism that correspond to the modal forms 3,4,5,6,7 and 8 with forced damped vibrations to depth of 200 mm.

La Figura 4 muestra las frecuencias resonantes de las formas modales 3,4,5,6,7 y 8 del prisma de suelo con vibraciones forzadas amortiguadas a una profundidad de 200 mm.

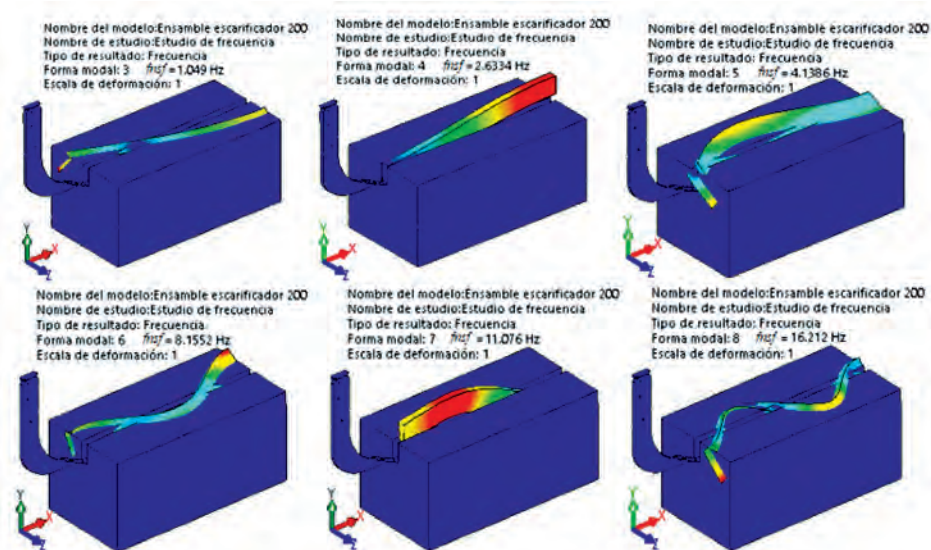


FIGURE 4. Modal forms of soil prism corresponding to vibration modes 3,4,5,6,7 and 8 with forced damped vibrations to a depth of 200 mm.
 FIGURA 4. Frecuencias resonantes de las formas modales 3,4,5,6,7 y 8 del prisma de suelo con vibraciones forzadas amortiguadas a una profundidad $a_c = 200$ mm.

Modal Analysis of the Bent Leg-Soil System

The statistical analysis (Table 6) included variance analysis, Scheffé (posteriori test for differences) and simple linear regression, for both free and forced vibrations.

Análisis modal del sistema brazo-suelo

El análisis estadístico (Tabla 6) incluyó análisis de varianza, Scheffer (prueba *a posteriori* para las diferencias) y regresión lineal simple, tanto para vibraciones libres como forzadas.

TABLE 6. Modal analysis of bent leg-soil system
TABLA 6. Análisis modal del sistema brazo-suelo

Depth (mm)	Vibration	Bent leg frequency (Hz)				Soil frequency (Hz)			
		Mean	Deviation standard	Minimum	Maximum	Mean	Deviation standard	Minimum	Maximum
200	Forced	581,504	437,078	2,210	1325,000	19,958	18,677	0,002	56,050
	Free	797,372	514,733	45,966	1583,500	118,582	37,338	0,003	149,910
300	Forced	581,504	437,078	2,210	1325,000	122,150	19,484	82,163	147,200
	Free	797,372	514,733	45,966	1583,500	119,717	21,012	74,560	146,280
400	Forced	581,504	437,078	2,210	1325,000	129,392	20,284	87,709	157,070
	Free	797,372	514,733	45,966	1583,500	129,364	20,303	87,718	157,190

Depth (mm)	Vibration	Bent leg amplitude (mm)				Soil amplitude (mm)			
		Mean	Deviation standard	Minimum	Maximum	Mean	Deviation standard	Minimum	Maximum
200	Free	15,807	20,082	2,330	68,200	0,335	0,116	0,120	0,530
	Forced	7,835	4,592	3,300	16,200	0,076	0,011	0,055	0,101
300	Free	15,807	20,082	2,330	68,200	0,095	0,028	0,060	0,130
	Forced	7,835	4,592	3,300	16,200	0,100	0,026	0,060	0,140
400	Free	15,807	20,082	2,330	68,200	0,114	0,041	0,064	0,208
	Forced	0,837	0,459	0,330	1,620	0,130	0,050	0,064	0,231

Variance Analysis

It is shown in Table 7. Significant differences exist in the soil frequencies and amplitudes, for both free and forced vibrations.

Análisis de varianza

El mismo se muestra en la Tabla 7. En ella se observa que existen diferencias significativas en las frecuencias y amplitudes del suelo, tanto para vibraciones libres como forzadas.

TABLE 7. ANOVA
TABLA 7. ANOVA

Diferences		Sum of squares	Degree of freedom	Quadratic mean	Fisher	Significance
Bent leg frequency (Hz)	Between groups	0,000	2	0,000	0,000	1,000
	Inside groups	8 023 566,900	42	191 037,307		
	Total	8 023 566,900	44	037,307		
Soil frequency (Hz)	Between groups	112 355,799	2	56 177,900	147,853	0,000
	Inside groups	15 958,263	42	379,959		
	Total	128 314,062	44			
Bent leg amplitude (mm)	Between groups	0,000	2	0,000	0,000	1,000
	Inside groups	16 938,412	42	403,296		
	Total	16 938,412	44			
Soil width (mm)	Between groups	0,531	2	0,266	49,770	0,000
	Inside groups	0,224	42	0,005		
	Total	0,756	44			

Frequency Analysis (free vibrations)

With free vibrations, to different working depths, the frequencies of the bent leg were not different (p=1); but in the frequencies of the soil significant differences were observed (p=0,000) between the depths 200 mm with 300 mm and

Análisis de frecuencias (vibraciones libres)

A diferentes profundidades de trabajo, con vibraciones libres, las frecuencias y amplitud del brazo no fueron distintas (p=1); pero en las frecuencias y amplitud del suelo sí se observaron diferencias significativas (p= 0,000) entre las profundidades

400 mm, respectively, but they were not observed between 300 mm and 400 mm (Table 8).

The changes in the magnitudes of the soil frequency are explained in 69,3% by the changes in the levels of the working depth (Figure 5). For each mm of depth increased or diminished, soil frequencies were increased or decreased 0,837 Hz. The changes of the soil frequency that are explained by other factors (residuals) are almost null (0,00).

200 mm con 300 mm y 400 mm, respectivamente, pero no entre 300 mm y 400 mm (Tabla 8).

Los cambios en las magnitudes de la frecuencia del suelo se explican en 69,3% por los cambios en los niveles de la profundidad de trabajo (Figura 5). Por cada mm de profundidad aumentado o disminuido, se incrementaron o decrecieron 0,837 Hz las frecuencias del suelo. Los cambios de frecuencia del suelo que se explican por otros factores son casi nulos (0,00).

Table 8. Multiple comparisons (free vibrations)
TABLA 8. Comparaciones múltiples (vibraciones libres)

Dependent variable		(I) Depth (mm)	(J) Depth (mm)	Means differences (I-J)	Standard error	95% confidence interval			
						Signif.	Upper limit	Lower limit	
Bent leg frequency (Hz)	Scheffé	200,0	300,0	200,0	159,598	1,000	-405,011	405,011	
			400,0	300,0	159,598	1,000	-405,011	405,011	
		300,0	200,0	200,0	159,598	1,000	-405,011	405,011	
			400,0	300,0	159,598	1,000	-405,011	405,011	
			400,0	200,0	200,0	159,598	1,000	-405,011	405,011
Soil frequency (Hz)	Scheffé	200,0	300,0	-102,191*	7,117	0,000	-120,253	-84,128	
			400,0	300,0	-109,433*	7,117	0,000	-127,495	-91,370
		300,0	200,0	102,191*	7,117	0,000	84,128	120,253	
			400,0	200,0	-7,242	7,117	0,600	-25,304	10,820
			400,0	300,0	109,433*	7,117	0,000	91,370	127,495
Bent leg amplitude (mm)	Scheffé	200,0	300,0	0,000	7,332 990	1,000	-18,608	18,608	
			400,0	300,0	0,000	7,332 990	1,000	-18,608	18,608
		300,0	200,0	0,000	7,332 990	1,000	-18,608	18,608	
			400,0	200,0	0,000	7,332 990	1,000	-18,608	18,608
			400,0	300,0	0,000	7,332 990	1,000	-18,608	18,608
Soil amplitude (mm)	Scheffé	200,0	300,0	0,239*	0,026 678	0,000	0,171	0,307	
			400,0	300,0	0,220*	0,026 678	0,000	0,152	0,287
		300,0	200,0	-0,239*	0,026 678	0,000	-0,307	-0,171	
			400,0	200,0	-0,019	0,026 678	0,772	-0,086	0,048
			400,0	300,0	-0,220*	0,026 678	0,000	-0,287	-0,152

*. The differences of means are significant in lever 0,05.

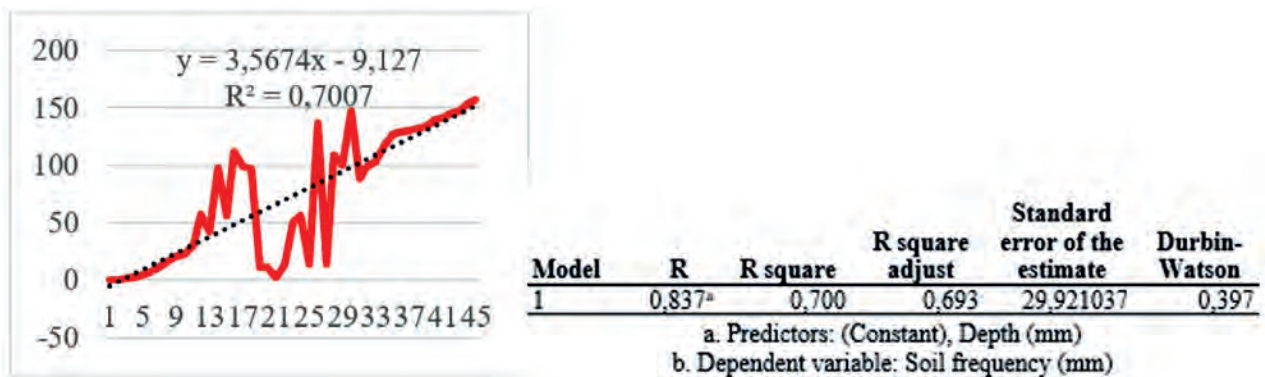


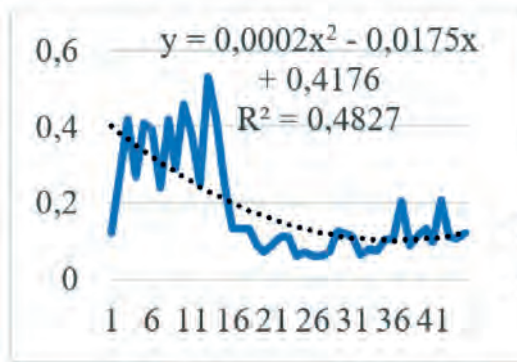
FIGURE 5. Soil frequency summary.
FIGURA 5. Resumen de las frecuencias del suelo.

The changes in the magnitudes of the soil amplitude are explained in 47% by the changes in the levels of the working

Los cambios en las magnitudes de la amplitud del suelo se explican en 47% por los cambios en los niveles de la profundidad

depth. For each mm of the working depth increased or diminished, it increased or it diminished 0,694 mm the soil width (Figure 6). The changes in the soil width due to other factors (residuals) they are almost null (0,00).

de trabajo. Por cada mm de profundidad de trabajo aumentado o disminuido, aumentó o disminuyó 0,694 mm la amplitud del suelo (Figura 6). Los cambios en la amplitud del suelo debidos a otros factores (residuos) son casi nulos (0,00).



Model	R	R square	R square adjust	Standard error of the estimate	Durbin-Watson
1	0,694 ^a	0,482	0,470	0,095434	1,071

a. Predictor: (Constant), Depth (mm)
 b. Dependent variable: Soil width (mm)

FIGURE 6. Soil width summary.
 FIGURA 6. Resumen de la amplitud del suelo.

Frequencies Analysis (forced vibrations)

With forced vibrations (Table 9), at different work depths, soil and bent leg frequencies were not different ($p > 0,05$); but the amplitudes were different significantly ($p = 0,000$) for both with evidence of the differences in the width of the bent leg, between the depths 400 mm with 200 mm and 300 mm respectively, but don't between 200 mm and 300 mm, as well as in the widths of the soil, between the depths 200 mm and 400 mm, but don't between 300 mm and 400 mm.

Análisis de frecuencias (vibraciones forzadas)

Con vibraciones forzadas (Tabla 9), a diferentes profundidades de trabajo, las frecuencias, tanto del brazo como del suelo no fueron distintas ($p > 0,05$); pero las amplitudes fueron diferentes de manera significativa ($p = 0,000$) para ambos, con evidencia de las diferencias en la amplitud del brazo, entre las profundidades 400 mm con 200 mm y 300 mm respectivamente, pero no entre 200 mm y 300 mm, así como en las amplitudes del suelo, entre las profundidades 200 mm y 400 mm, pero no entre 300 mm y 400 mm.

TABLE 9. Multiple comparisons (forced vibrations)
 TABLA 9. Comparaciones múltiples (vibraciones forzadas)

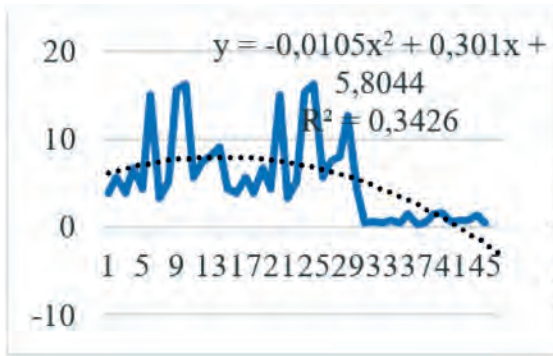
Dependent variable	(I) Depth (mm)	(J) Depth (mm)	Mean differences (I-J)	Standard error	95% confidence interval		
					Signif.	Upper limit	Lower limit
Bent leg amplitude (mm)	200,00	300,00	0,00000	1,37259	1,000	-3,4832	3,4832
		400,00	7,05120*	1,37259	0,000	3,5680	10,5344
	300,00	200,00	0,00000	1,37259	1,000	-3,4832	3,4832
		400,00	7,05120*	1,37259	0,000	3,5680	10,5344
Soil amplitude (mm)	200,00	300,00	-0,02393	0,01217	0,157	-0,0548	0,0069
		400,00	-0,05453*	0,01217	0,000	-0,0854	-0,0237
	300,00	200,00	0,02393	0,01217	0,157	-0,0069	0,0548
		400,00	-0,03060	0,01217	0,053	-0,0615	0,0003
Bent leg Frequency (Hz)	200,00	300,00	0,00000	187,95374	1,000	-476,9688	476,9688
		400,00	0,00000	187,95374	1,000	-476,9688	476,9688
	300,00	200,00	0,00000	187,95374	1,000	-476,9688	476,9688
		400,00	0,00000	187,95374	1,000	-476,9688	476,9688
400,00	200,00	0,00000	187,95374	1,000	-476,9688	476,9688	
	300,00	0,00000	187,95374	1,000	-476,9688	476,9688	

Dependent variable	(I) Depth (mm)	(J) Depth (mm)	Mean differences (I-J)	Standard error	95% confidence interval		
					Signif.	Upper limit	Lower limit
Soil Scheffé Frequency (Hz)	200,00	300,00	-1,13507	9,99518	0,994	-26,4998	24,2296
	300,00	400,00	-10,78207	9,99518	0,563	-36,1468	14,5826
		200,00	1,13507	9,99518	0,994	-24,2296	26,4998
	400,00	400,00	-9,64700	9,99518	0,631	-35,0117	15,7177
		200,00	10,78207	9,99518	0,563	-14,5826	36,1468
	300,00	300,00	9,64700	9,99518	0,631	-15,7177	35,0117

*. The differences of means are significant in lever 0,05

The changes in the bent leg amplitude are explained in 32,7% by the changes in the depth levels. For each mm of depth increased, its amplitude diminished 0,585 mm (Figure 7). In the case of the soil amplitude, 30,7% of the changes is due to changes in the depth levels and, for variations of depth per mm, the soil amplitude varied 0,568 mm (Figure 8).

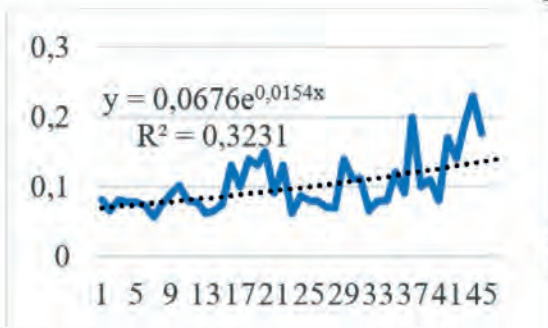
Los cambios en la amplitud del brazo se explican en 32,7 % por los cambios en los niveles de profundidad. Por cada mm de profundidad que aumentó, disminuyó en 0,585 mm su amplitud (Figura 7). En el caso de la amplitud del suelo, el 30,7 % de los cambios se deben a cambios en los horizontes de profundidad y, para variaciones de profundidad por mm, la amplitud del suelo varió 0,568 mm (Figura 8).



Model	R	R square	R square adjust	Standard error of the estimate	Durbin-Watson
1	,585 ^a	0,342	0,327	4,08559	1,657

a. Predictor: (Constant), Depth (mm)
b. Dependent variable: Bent leg width (mm)

FIGURE 7. Bent leg amplitude summary
FIGURA 7. Resumen amplitud del brazo.



Model	R	R square	R square adjust	Standard error of the estimate	Durbin-Watson
1	0,568 ^a	0,323	0,307	0,03297	1,274

a. Predictor: (Constant), Depth (mm)
b. Dependent variable: Soil width (mm)

FIGURE 8. Soil amplitude summary
FIGURA 8. Resumen amplitud del suelo.

CONCLUSIONS

- From the modal analysis by finite elements carried out both to the arm of the subsoiler and to the ground, the first fifteen modal forms were obtained, as well as the corresponding natural frequencies, both for undamped free vibrations and for damped forced vibrations.
- The resonant frequencies of the boom obtained from the frequency study corresponding to the first two vibration modes (2.20, 8.47 and 13.35 Hz) at an operating depth of 200

CONCLUSIONES

- Del análisis modal por elementos finitos realizados tanto al brazo del subsolador como al suelo se obtuvieron las primeras quince formas modales, así como las correspondientes frecuencias naturales, tanto para vibraciones libres no amortiguadas como para vibraciones forzadas amortiguadas.
- Las frecuencias resonantes del brazo obtenidas del estudio de frecuencia correspondientes a los dos primeros modos de vibración (2,20; 8,47 y 13,35 Hz) a una profundidad de operación de

- mm allow better soil loosening. modal form 2 in the second mode, have the most appropriate resonant frequencies for loosening of soil.
- The frequency study carried out on the soil model at different working depths shows that, with damped forced vibrations of the arm, at a working depth of 200 mm, the resonant frequencies are obtained (2.63; 4.13; 8, 15; 11.07 and 16.21 Hz), which allow a greater crumbling of it.
 - Statistical analysis for free vibrations showed that, at different working depths, the frequencies and amplitude of the arm were not different ($p = 1$); but in the frequencies and amplitude of the soil, significant differences ($p = 0.000$) were observed between the depths 200 mm with 300 mm and 400 mm, respectively, but not between 300 mm and 400 mm. With forced vibrations, to different work depths, the frequencies, for both, the bent leg and the soil were not different, but the widths were significantly different for both.
- 200 mm permiten un mejor aflojamiento del suelo.
- El estudio de frecuencia realizado al modelo de suelo a diferentes profundidades de trabajo muestra que, con vibraciones forzadas amortiguadas del brazo, a una profundidad de trabajo de 200 mm, se obtienen las frecuencias resonantes (2,63; 4,13; 8,15; 11,07 y 16,21 Hz), las cuales permiten un mayor desmenuzamiento del mismo.
 - El análisis estadístico para vibraciones libres mostró que, a diferentes profundidades de trabajo, las frecuencias y amplitud del brazo no fueron distintas ($p=1$); pero en las frecuencias y amplitud del suelo sí se observaron diferencias significativas ($p=0,000$) entre las profundidades 200 mm con 300 mm y 400 mm, respectivamente, pero no entre 300 mm y 400 mm. Con vibraciones forzadas, a diferentes profundidades de trabajo, las frecuencias, tanto del brazo como del suelo no fueron distintas, pero las amplitudes fueron significativamente diferentes para ambos.

REFERENCES

- ANI, A.; UZOEJINWA, B.; EZEAMA, O.; UGWU, S.; OHAGWU, C.; ODIGBOH, E.: "Soil bin facility for soil-machine interaction studies", En: *International Soil Tillage Research Organization (ISTRO) Nigeria Symposium, Akure, November 3 - 6*, Ed. International Soil Tillage Research Organization (ISTRO), Department of Agricultural and Bioresources Engineering, University of Nigeria, Nsukka, pp. 110–124, 2014.
- BANDALAN, E.; SALOKHE, V.; GUPTA, C.; NIYAMAPA, T.: "Performance of an oscillating subsoiler in breaking a hardpan", *Journal of Terramechanics*, 36(2): 117-125, 1999, ISSN: 0022-4898.
- BUTSON, M.; MACINTYRE, D.: "Vibratory soil cutting: I. Soil tank studies of draught and power requirements", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 26(5): 409-418, 1981, ISSN: 0021-8634.
- DE LA ROSA, A.A.A.; HERRERA, S.M.; GONZÁLEZ, C.O.: "Los Modelos Constitutivos para la Simulación de la Respuesta Mecánica de los Suelos Agrícolas mediante el Métodos de Elementos Finito (MEF).", *Revista de Investigaciones de la Universidad Le Cordon Bleu*, 1(1): 49-59, 2014, ISSN: 2409-1537.
- GARCÍA DE LA FIGAL, C.: "Estudio de la fricción suelo-metal y suelo-plástico para dos suelos cañeros cubanos", *Ciencias Técnicas, Ingeniería en la Construcción de Maquinaria*, 3(1): 107-122, 1978.
- GARCÍA DE LA FIGAL, C.A.: "Estudio de las propiedades tecnológicas más importantes de los suelos cubanos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 3(2): 61-77, 1991, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- GONZÁLEZ, C.O.; HERRERA, S.M.; IGLESIAS, C.C.E.; LÓPEZ, B.E.: "Modelos constitutivos drucker prager extendido y drucker prager modificado para suelos rhodic ferralsol", *Terra Latinoamericana*, 32(4): 283-290, 2014, ISSN: 0187-5779.
- HERNÁNDEZ, J.A.; PÉREZ, J.J.M.; BOSCH, I.D.; CASTRO, S.: *Clasificación de los suelos de Cuba*, Ed. INCA, Ediciones INCA ed., San Jose de las Lajas, Mayabeque. Cuba, 93 p., 2015, ISBN: 978-959-7023-77-7.
- HERRERA, S.M.; IGLESIAS, C.C.E.; GONZÁLEZ, C.O.; LÓPEZ, B.E.; SÁNCHEZ, I.Á.: "Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos: Parte I", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(3): 31-38, 2008a, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- HERRERA, S.M.; IGLESIAS, C.C.E.; GONZÁLEZ, C.O.; LÓPEZ, B.E.; SÁNCHEZ, I.Á.: "Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos: Parte II. Interfase suelo-herramienta", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(4): 50-54, 2008b, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- IBRAHMI, A.; BENTAHER, H.; HBAIEB, M.; MAALEJ, A.; MOUAZEN, M.A.: "Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part I. Finite element simulation", *Computers and Electronics in Agriculture*, 117: 258-267, 2015, ISSN: 0168-1699.
- KAROONBOONYANAN, R.; SALOKHE, V.; NIYAMAPA, T.; NAKASHIMA, H.: "Vibration effects on the performance of a single-shank subsoiler", *Agricultural Engineering International: CIGR Journal E journal. Manuscript PM 07 018*, 9, 2007, ISSN: 1682-1130.
- LARSON, L.W.: "The future of vibratory tillage tools", *Transactions of the ASAE*, 10(1): 78-79, 1967, ISSN: 2151-0032.
- LUNA, L.A.; GONZÁLEZ, I.J.A.: "Estudio de la influencia de las vibraciones verticales en los requerimientos energéticos del laboreo profundo del suelo", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 11(3): 39-41, 2002, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- MARÍN, C.L.O.; GARCÍA DE LA FIGAL, A.E.; MARTÍNEZ, R.A.: "Effect of the Geometry and Operational Conditions in the Draft Forces of the Arm of a Vibratory Scarifier", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(2), 2020, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- MARÍN, C.L.O.; GARCÍA DE LA FIGAL, C.A.: "Model of Soil-Tillage Tool Interaction Using Finite Element Method", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(4), 2019, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- PREM, M.; SWARNKAR, R.; KANTILAL, V.D.K.; JEETSINH, P.S.K.; CHITHARBHAI, K.B.: "Combined tillage tools-a review", *Current Agriculture Research Journal*, 4(2): 179-185, 2016, ISSN: 2347-4688.
- RAO, G.; CHAUDHARY, H.: "A review on effect of vibration in tillage application", En: *IOP Conference Series: Materials Science and En-*

gineering, ser. Mater. Sci. Eng.. 377 012030, Ed. IOP Publishing, vol. 377, 2018, ISBN: 1757-899X.

RAO, G.; CHAUDHARY, H.; SHARMA, A.: "Design and analysis of vibratory mechanism for tillage application", *Open Agriculture*, 3(1): 437-443, 2018.

SHAHGOLI, G.; FIELKE, J.; DESBIOLLES, J.; SAUNDERS, C.: "Optimising oscillation frequency in oscillatory tillage", *Soil and tillage research*, 106(2): 202-210, 2010, ISSN: 0167-1987.

SHKURENKO, N.S.: *Experimental data on the effect of oscillation on the cutting resistance of soil*, Ed. National Institute of Agricultural Engineering, USA, 1966.

SMITH, J.L.; DAIS, J.L.; FLIKKE, A.M.: "Theoretical analysis of vibratory tillage", *Transactions of the ASAE*, 15(5): 831-883, 1972, ISSN: 2151-0032.

SULATISKY, M.T.; UKRAINETS, P.R.: "Draft reduction by vibratory soil cutting", *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 1(4): 175-181, 1972.

ZHANG, J.: *Vibratory analysis of tillage operation*, University of Saskatchewan, Department of Agricultural and Bioresource Engineering, Doctoral Thesis, Saskatchewan, Canada, 1997.

Luis Orlando Marin-Cabrera, Especialista, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: luismc@unah.edu.cu ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-2545-8865>

Armando Eloy García de la Figal-Costales, Profesor Titular, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: areloy@unah.edu.cu ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0001-7658-563X>

Arturo Martínez-Rodríguez, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: armaro646@gmail.com

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.



CENTRO DE MECANIZACIÓN AGROPECUARIA

LABORATORIO DE OLEOHIDRÁULICA

SERVICIOS CIENTIFICO-TECNICOS



- Descontaminación de aceites oleohidráulicos
- Fabricación de equipos portátiles de filtraje de aceites
- Recuperación (emboquillado) y fabricación de mangueras
- Diagnóstico y evaluación de circuitos oleohidráulicos y sus componentes
- Cursos y entrenamientos de posgrado

Solicitudes de ofertas a:

Dr.C. Yanara Rodríguez López
Centro de Mecanización Agropecuaria
Autopista Nacional y Carretera de
Tapaste. km 23, San José de las Lajas,
Mayabeque, Cuba. Apdo. 18-19
Tel.: (53)(47) 864346
e_mail: yanita@unah.edu.cu