

ARTÍCULO ORIGINAL

# Evaluación de la validez del modelo constitutivo Drucker Prager Extendido para la simulación de la respuesta mecánica de un Vertisol de la región central de Cuba

## *Validity assessment of the Constitutive Model Drucker Prager Extended for mechanical response simulation of a Vertisol in the central region of Cuba*

Alain Ariel de la Rosa Andino<sup>1</sup>; Miguel Herrera Suárez<sup>2</sup>, Omar González Cueto<sup>3</sup>, Lázaro Ventura Benítez Leyva<sup>4</sup>, Inhaudis Calzada Pompa<sup>4</sup> y Laura García Pedraza<sup>5</sup>

**RESUMEN.** El presente trabajo se efectúa con el objetivo de evaluar el modelo constitutivo Drucker Prager Extendido para la simulación de la respuesta mecánica de un Vertisol de la región central de Cuba a través del método de elementos finitos. Para la simulación de la respuesta mecánica del suelo en estudio se emplea el software ABAQUS/CAE 6.8.1 como herramienta computacional. La simulación comprendió: la descripción del problema a simular, definición del modelo virtual, definición de las propiedades y parámetros requeridos por el modelo constitutivo, el establecimiento de las condiciones de frontera, la creación de la malla del elemento finito, la simulación de la respuesta mecánica del suelo, determinación del error de pronóstico y si existe diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones acumuladas de las magnitudes observadas y predichas. Los resultados evidencian que la exactitud del modelo Drucker Prager Extendido en la predicción de la respuesta mecánica del suelo objeto de estudio, depende de su estado de humedad y densidad, así como de la configuración del modelo. Los menores errores en las predicciones (4,14 a 31,04%) se obtuvieron, para un rango de valores de humedad de 30 a 40% y densidad de 1,05 a 1,10 g cm<sup>-3</sup> respectivamente.

**Palabras clave:** Simulación, respuesta mecánica del suelo, métodos numéricos, modelo constitutivo, propiedades mecánicas, condiciones de frontera.

**ABSTRACT.** The present work takes place with the aim of evaluating the constituent model Drucker Prager Extended for the simulation of the mechanical answer of a Vertisol of the central region of Cuba through method of finite elements. For the simulation of the mechanical answer of the soil in study the software ABAQUS/CAE 6.8.1 was used as a computer tool. The simulation included: the description of the problem to simulate, definition of the virtual model, definition of the properties and parameters required by the constituent model, the establishment of the conditions of border, the creation of meshes of the finite element, the simulation of the mechanical answer of the soil determination of the prognosis mistake and if statistically significant difference between the accumulated distributions of the observed and predicted magnitudes exists. The results demonstrate that the exactitude of the model Drucker Prager Extended in the prediction of the mechanical answer of the soil study object, depends on their state of humidity and density bulk, as well as of the configuration of the model. The smaller mistake in the predictions (4,14 to 31,04%) were obtained, for a rank of values of humidity of 30 to 40% and density bulk of 1,05 to 1,10 g cm<sup>-3</sup> respectively.

**Keywords:** Simulation, mechanical answer, numerical methods, constitutive models, mechanical properties, conditions of borders.

Recibido 21/09/11, aprobado 12/12/12, trabajo 05/13, artículo original.

<sup>1</sup> Ing., Prof. Asistente, Universidad de Granma, Facultad. de Ciencias Técnicas, Granma. CP 85100, E-✉: [arosaa@udg.co.cu](mailto:arosaa@udg.co.cu)

<sup>2</sup> Dr.C. Prof. Titular, Universidad Central de Las Villas. Dpto. Ciencias Técnicas, Villa Clara, Cuba.

<sup>3</sup> Dr.C. Prof. Auxiliar Universidad Central de Las Villas. Dpto. Ciencias Técnicas, Villa Clara, Cuba.

<sup>4</sup> Ing. Prof. Instructor, Universidad de Granma, Facultad. de Ciencias Técnicas, Granma, Cuba.

<sup>5</sup> Ing. Prof. Instructor, Universidad Central de Las Villas. Dpto. Ciencias Técnicas, Villa Clara, Cuba.

## INTRODUCCIÓN

El suelo constituye el medio fundamental o imprescindible de la producción agropecuaria, este es el encargado de suministrar el agua y los nutrientes a las plantas para su desarrollo. Cuba es un país con una gran variedad de suelos agrícolas, y con las transformaciones en el orden político, económico y social ha tenido lugar la intensificación del laboreo de los mismos, lo que exige de un profundo conocimiento de ellos, con vistas a su mejor uso y manejo (Cairo y Quintero, 1980).

Uno de los suelos de marcada importancia agrícola en Cuba lo constituye el Vertisol, el cual presenta una extensión de 694,9 miles de hectáreas (Cuba. Ministerio de la Agricultura, 1999). Este presenta una textura arcillosa, donde predominan las arcillas montmorillonita, claritas y vermículitas, caracterizadas por su arcilla densa, que siempre es plástica, nunca friable y no pueden alterarse eficazmente con ningún método conocido de laboreo.

Durante la sequía se origina un profundo agrietamiento, aunque vuelven a su estado de alta densidad aparente o de volumen en el período de lluvia (Cairo y Quintero, 1980; Cerana *et al.*, 2005). La densidad aparente es una propiedad hidrofísica del suelo que entre otros aspectos es un indicador del grado de compactación del suelo, resultando un indicador útil a la hora de tomar decisiones en cuanto al manejo de suelos durante la labranza y el tráfico de la maquinaria.

De forma general, los vertisoles son afectados por la compactación y mal drenaje, lo cual sumado a la incidencia de las lluvias en la mayor parte del año provoca que el período de tiempo disponible para realizar los trabajos agrícolas sea corto, por lo tanto es necesario utilizar técnicas de laboreo apropiadas y de alta productividad.

Estos suelos dada su importancia agrícola presentan un alto grado de mecanización, razón por la que se han llevado a cabo una serie de investigaciones con el objetivo de mejorar o modificar los órganos de trabajos de los aperos de labranza, en aras de buscar mejor racionalidad agroenergética, minimizar la compactación y los costos de labranza (Rodríguez *et al.*, 1990; Herrera, 2001; Herrera *et al.*, 2001a; Herrera *et al.*, 2001b; Herrera *et al.*, 2008a; Leyva, 2009). Estas investigaciones se han desarrollado utilizando los métodos basados en las investigaciones experimentales y métodos analíticos, sin embargo, no existen antecedentes de estudios realizados en los Vertisol para la solución de los problemas anteriormente descritos, a través de los métodos numéricos, específicamente el de elementos finitos, el cual utiliza los modelos constitutivos para expresar la relación esfuerzo deformación de los materiales, como lo es el modelo Drucker Prager Extendido (DPE). Este modelo ha sido ampliamente utilizado en estudios relacionados con la simulación de la interacción neumático-suelo, respuesta mecánica de suelos agrícolas y de la interacción suelo-apero de labranza (Abu-Hamed y Reeder, 2003; Abo-Elnor *et al.*, 2004; Xiang-rong y Jin-chang, 2004; Herrera, 2006a; Jafari *et al.*, 2006; Davoudi *et al.*, 2008; Herrera *et al.*, 2008b; González, 2011). El modelo de DPE tiene la ventaja de predecir los cambios de tensiones producto de la deformación por ablandamiento o endurecimiento, toma en cuenta las reglas de flujo, por lo que puede considerar que el suelo fluye de manera asociada o no asociada y como ventaja adicional aparece implementado en la mayoría de los softwares comerciales para procesos de simulación.

En Cuba, ha sido utilizado por Herrera (2006a) y por González (2011) en la investigación de la respuesta mecánica de

los suelos Ferralíticos rojos compactados, sin embargo, no se conoce cómo representa la respuesta mecánica de los Vertisol. Tomando en cuenta la importancia que presenta el suelo en estudio para Cuba y las ventajas que presenta el modelo Drucker Prager Extendido, se desarrolla el presente trabajo que tiene como objetivo: evaluar el modelo constitutivo Drucker Prager Extendido para la simulación de la respuesta mecánica de un Vertisol de la región central de Cuba.

## MÉTODOS

### Implementación de los modelos en la herramienta computacional

Para la simulación de la respuesta mecánica del suelo en estudio se empleó el software **ABAQUS-CAE** versión 6.8.1 como herramienta computacional. La simulación comprendió: la descripción del problema a simular; definición del modelo virtual que representa de forma idealizada el problema a analizar; definición de las propiedades y parámetros requeridos por el modelo constitutivo; se establecen las condiciones de fronteras; y la creación de la malla del elemento finito; se simula la respuesta mecánica del suelo; se determina el error de pronóstico y si existe diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones acumuladas de las magnitudes observadas y las predichas.

**Descripción del problema objeto de simulación.** Proceso de ensayo compresión triaxial rápido, sin consolidar, no drenado, de una probeta de suelo cilíndrica, con geometría y dimensiones similares a la utilizadas en los ensayos realizados en el laboratorio. Durante este proceso un espécimen cilíndrico de suelo es sometido a compresión triaxial mediante la acción de la fuerza normal que ejerce la prensa axial a una velocidad de  $1,27 \text{ mm s}^{-1}$  y la presión lateral que ejerce el líquido, la cual funciona como presión de confinamiento sobre la muestra de suelo. En la parte superior e inferior de la muestra son colocados dos platos que funcionan como apoyo de la misma, y además se tiene en cuenta que durante el ensayo no existe desplazamiento, ni rotación de la probeta.



FIGURA 1. Cámara de compresión triaxial.

**Definición del modelo virtual.** El modelo definido en este estudio representa el ensayo de compresión triaxial, rápido, sin consolidar, no drenado, descrito anteriormente. El espécimen de suelo se representó como un cilindro tridimensional, con dimensiones de 0,1 m de altura y 0,05 m de diámetro, iguales a las de los especímenes empleados en las investigaciones experimentales (Figura 2). El modelo se idealizó sin la representación de los platos superior e inferior que interactúan con la misma, pues sus efectos se tomaron en cuenta a la hora de establecer las condiciones de fronteras.

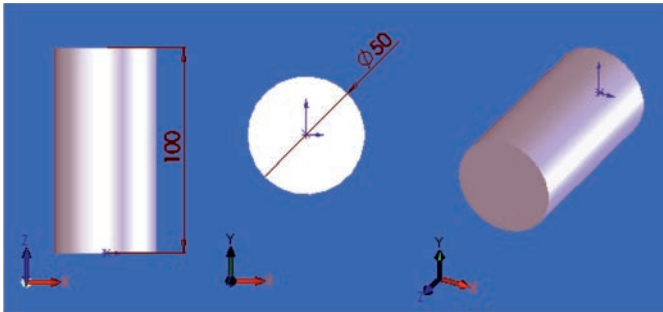


FIGURA 2. Modelo virtual (ensayo de compresión triaxial).

**Propiedades mecánicas y parámetros constitutivos del suelo requeridos como datos de entrada por el modelo**

Las propiedades mecánica y parámetros constitutivos se tomaron de las investigaciones realizadas por (de la Rosa y

Herrera, 2010; de la Rosa *et al.*, 2011; de la Rosa Andino, 2011; de la Rosa y Herrera, 2011).

La simulación comprendió las nueve condiciones de humedad y densidad de suelo definidas durante la experimentación (Tabla 1), garantizando la comprobación de la validez del modelo de Drucker Prager Extendido para predecir la respuesta mecánica del suelo en los distintos niveles de humedad y densidad.

El valor del coeficiente K, que relaciona los esfuerzos desviadores se determinó indirectamente por la ecuación (1), a partir del valor del ángulo de fricción interna determinado experimentalmente.

$$K = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi} \tag{1}$$

donde:

$\phi$  - es el ángulo de fricción interna del suelo.

Se realizaron otras nueve simulaciones para cada condición de suelo considerando (K=1), con el objetivo de analizar la influencia de este parámetro en las predicciones.

De igual forma con objetivo de analizar la influencia del ángulo de dilatancia ( $\psi$ ), se adicionan a las nueve simulaciones para la condición de suelo dilatante otras nueve para la condición de suelo no dilatante ( $\psi=0$ ). En las veintisiete variantes analizadas se tuvo en cuenta el trabajo de endurecimiento. Finalmente se realizaron también dieciocho simulaciones para la condición de suelo no dilatante ( $\psi=0$ ) donde no se tuvo en cuenta el trabajo del endurecimiento. En total se realizaron 45 simulaciones.

**TABLA 1. Propiedades y parámetros constitutivo requeridos por el modelo**

	H, %	$\gamma\delta$	v, adim.	E, kPa	$\sigma_{\phi}$ , kPa	$\psi$ ,	Modelo DruckKer Prager_Extendido	
							K, adim.	$\beta$
1	27	1,05	0,35	9152,0	126,59	46,63	0,80	46,63
2	51	1,09	0,25	5972,0	59,72	22,85	0,88	22,85
3	40	1,05	0,30	3565,0	87,39	20,74	0,89	20,74
4	50	0,90	0,25	1878,0	41,12	13,66	0,93	13,66
5	33	1,10	0,32	6631,0	152,42	19,62	0,89	19,62
6	34	0,99	0,32	4126,0	87,39	32,14	0,83	32,14
7	34	1,05	0,32	2755,0	62,00	30,52	0,84	30,52
8	34	1,04	0,32	6461,0	93,00	29,33	0,84	29,33
9	21	1,19	0,38	9098,0	134,34	40,17	0,80	40,17
10	27	1,05	0,35	9152,0	126,59	46,63	1	46,63
11	51	1,09	0,25	5972,0	59,72	22,85	1	22,85
12	40	1,05	0,30	3565,0	87,39	20,74	1	20,74
13	50	0,90	0,25	1878,0	41,12	13,66	1	13,66
14	33	1,10	0,32	6631,0	152,42	19,62	1	19,62
15	34	0,99	0,32	4126,0	87,39	32,14	1	32,14
16	34	1,05	0,32	2755,0	62,00	30,52	1	30,52
17	34	1,04	0,32	6461,0	93,00	29,33	1	29,33
18	21	1,19	0,38	9098,0	134,34	40,17	1	40,17
19	27	1,05	0,35	9152,0	126,59	0	0,80	46,63
20	51	1,09	0,25	5972,0	59,72	0	0,88	22,85

	H, %	$\gamma\delta$	$\nu$ , adim.	E, kPa	$\sigma_{\phi}$ , kPa	$\psi$ ,	Modelo	
							DruckKer K, adim.	Prager_Extendido $\beta$
21	40	1,05	0,30	3565,0	87,39	0	0,89	20,74
22	50	0,90	0,25	1878,0	41,12	0	0,93	13,66
23	33	1,10	0,32	6631,0	152,42	0	0,89	19,62
24	34	0,99	0,32	4126,0	87,39	0	0,83	32,14
25	34	1,05	0,32	2755,0	62,00	0	0,84	30,52
26	34	1,04	0,32	6461,0	93,00	0	0,84	29,33
27	21	1,19	0,38	9098,0	134,34	0	0,80	40,17

**Condiciones de fronteras.** Se establecieron en función de las fuerzas actuantes y las condiciones de bordes prevaletientes durante el ensayo de compresión triaxial.

Para garantizar este proceso, la simulación del ensayo de compresión triaxial se ejecutó en dos pasos de programa. En el paso inicial, se garantizó el equilibrio de las fuerzas actuantes sobre la probeta de suelo, mediante la opción **\*GEOSTATIC del ABAQUS**. A través de la misma se restringe el movimiento para las superficies inferior y superior en los ejes (x, y, z). Sobre la superficie superior y las caras laterales de la muestra de suelo actúa una presión que realiza la función de presión de confinamiento ( $\sigma_3$ ), sus magnitudes coinciden con las empleadas en los ensayos experimentales (35, 50, 75 y 100 kPa). En el segundo paso **COMPRESIÓN TRIAXIAL** se mantienen las condiciones anteriormente establecidas, con la diferencia que a la superficie superior se impone un desplazamiento en el eje vertical (z) de igual magnitud a la deformación axial que sufre la probeta durante los ensayos, (0,01 a 0,02 m).

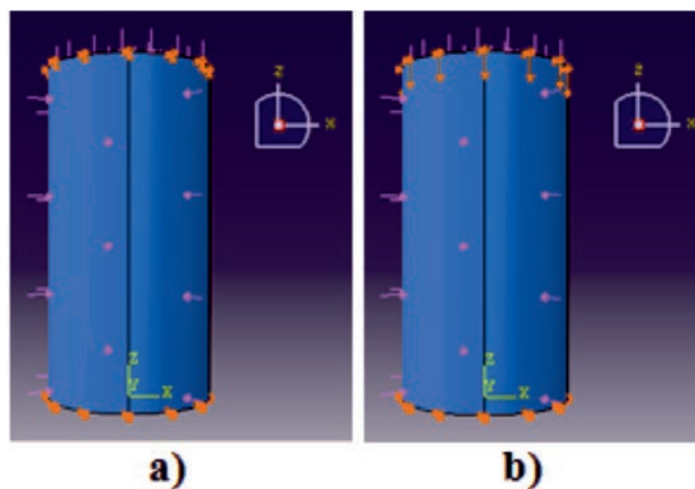


FIGURA 3. Condiciones de frontera. a) Primer paso, Geostatic; b) Segundo paso, compresión triaxial.

**Selección del tipo de elemento finito a emplear.** El software ABAQUS 6.8-1 incluye tres tipos de elementos finitos para la modelación de procesos físicos, que en su forma básica, son: rectangulares, hexaédricos de ocho nodos (C3D8); tipo cuña, lineales de seis nodos (C3D6); y triangulares, lineales tetraédricos de cuatro nodos (C3D4). De estos elementos, el triangular producto de su versatilidad y a la capacidad de adaptarse a cualquier forma de la superficie son los más utilizados en la discretización de geometrías complejas, sin embargo, el rectangular es mucho más preciso y genera menor número de ecuaciones para un mismo volumen (López, 2010). Estos tres elementos básicos poseen variantes que dependen de la forma en que se formula la integración; si se consideran o no, la transferencia de calor, presión de poros, y efectos piezoeléctricos entre otros.

Además de estos criterios para la selección del elemento finito a emplear, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos

por Herrera (2006a) y González (2011), donde se demuestra que los resultados más exactos se obtienen cuando se utilizan elementos rectangulares con integración reducida (C3D8R), además de emplearse un menor tiempo de computo, (Figura 4). A partir de estos criterios se define este tipo de elemento para realizar las simulaciones.

Análisis de la densidad de malla para la definición del tamaño del elemento finito.

Este análisis se ejecutó con el objetivo de determinar el tamaño del elemento, por lo que se procedió a realizar el ensayo de compresión triaxial de la probeta de suelo para ocho dimensiones diferentes de los elementos, manteniendo constante todas las propiedades y parámetros de entrada. Como variable de control se tomaron las máximas tensiones ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) que actúan sobre la muestra de suelo. Las características de los modelos empleados se muestran en la Tabla 2.



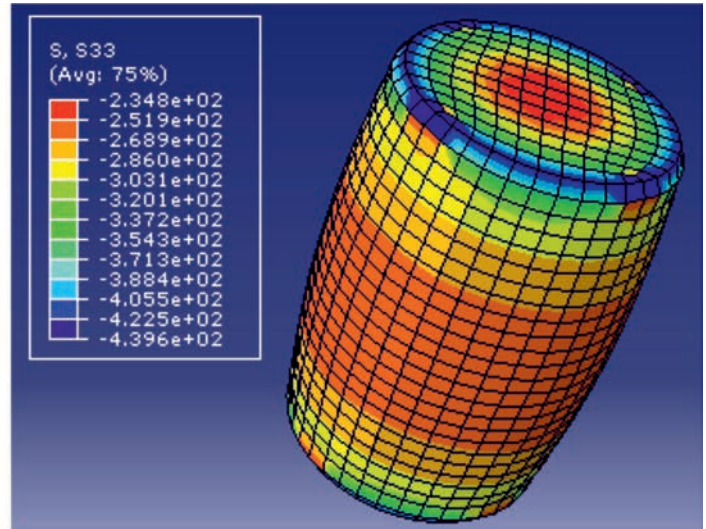
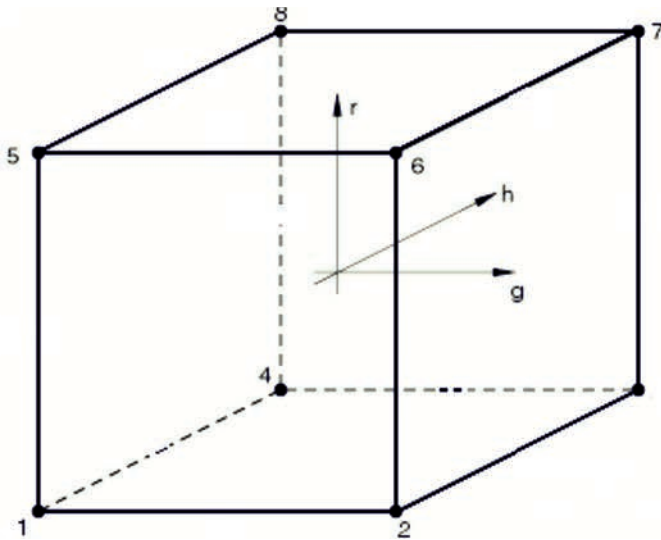


FIGURA 4. Elemento rectangular lineal hexaédrico de ocho nodos con integración reducida (C3D8R) utilizado para la discretización del modelo.

TABLA 2. Características de los modelos empleados en la definición del tamaño del elemento

Modelo	Elemento	Cantidad de elementos	Cantidad de nodos	Tamaño del elemento (mm)
Modelo 1		1 292	1 638	6,0
Modelo 2		1 872	2 261	5,5
Modelo 3		1 920	2 373	5,0
Modelo 4	C3D8R	3 344	3 933	4,5
Modelo 5		3 500	4 186	4,0
Modelo 6		6 032	6 932	3,5
Modelo 7		8 976	10 166	3,0
Modelo 8		15 360	17 097	2,5

El análisis de los resultados en cada uno de los modelos (Figura. 5), mostró que el tamaño óptimo del elemento finito oscila de 3 a 3,5 mm. Para efecto de esta investigación se tomará como tamaño óptimo 3,5 mm, pues con esta dimensión se garantiza que los errores de las predicciones se mantengan en el rango mínimo, además de que el tiempo de cómputo empleado es menor que para tamaños de 3 mm.

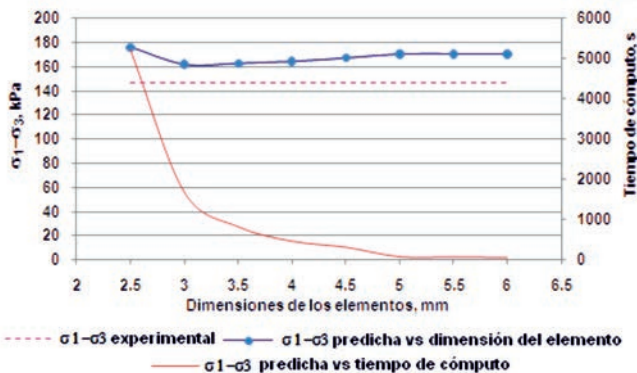


FIGURA 5.  $\sigma_1-\sigma_3$  vs. dimensión del elemento y tiempo de cómputo. Procesador Dual Core a 1,60 GHz, 1 GB de memoria RAM.

Una vez definidas las características de los elementos finitos que se deben emplear en la discretización de los modelos, se realizó el mallado de los mismos. En este caso, se realizó un mallado estructurado con un total de 6 032 elementos 3D, lineales hexaédricos de ocho nodos del tipo C3D8R, (Figura. 6).

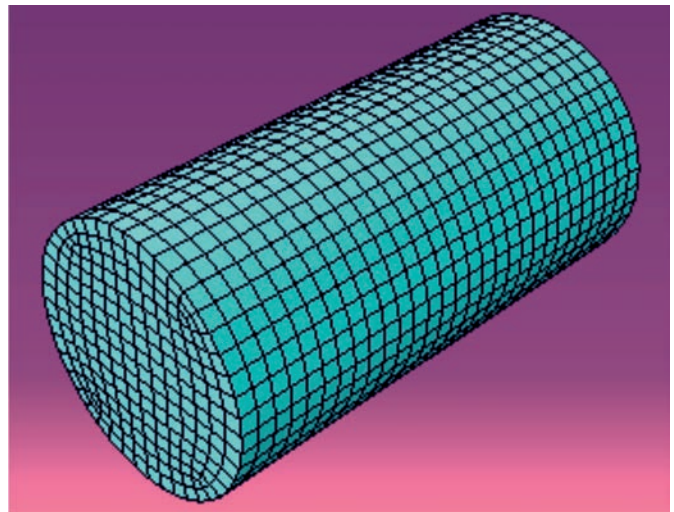


FIGURA 6. Malla de elementos finitos. Triaxial.

Método para la determinación del error en las predicciones

Con el objetivo de seleccionar cual de las predicciones describe con mayor ajuste más exactitud la respuesta del suelo objeto de estudio, se realizó un análisis de los errores de pronóstico, para lo cual se emplearon normas, de distancia y error, entre los valores de pronóstico (o modelados) y los resultados experimentales. El error de pronóstico se determinó, como:

$$\text{Error} = \frac{\text{Mobs} - \text{Mpred}}{\text{Mobs}} \cdot 100 \quad (2)$$

donde:

Error: error de pronóstico, %;

Mobs: Magnitud real observada experimentalmente;

Mpred: Magnitud de pronóstico.

También se recurrió al empleo de la prueba de Kolmogorov-Smirnov con el objetivo de determinar si existe diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones acumuladas de las magnitudes observadas y las predichas. El procesamiento estadístico se ejecutó con el software Statgraphics Centurion XV.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la simulación de la respuesta mecánica del suelo. Validez del modelo de Drucker Prager Extendido

Los resultados de la simulación de la respuesta mecánica del suelo mediante el empleo del modelo Drucker Prager Extendido muestran que, el valor del error medio absoluto (EMA) de las predicciones oscila desde un 4,14 a 56,99%. En la Tabla 3, se

observa que los mayores errores en la predicción (56,99%), se obtienen para las simulaciones donde el suelo posee un contenido de humedad del 50% y una densidad de 0,90 g·cm<sup>-3</sup>. Sin embargo, para las simulaciones realizadas con un contenido de humedad medio (30 a 40%) el error medio absoluto osciló entre 4,14 y 31,04%, dependiendo del estado de densificación del suelo y de la configuración que tome el modelo.

En los casos donde el suelo posee un contenido de humedad bajo (21 y 27%), las magnitudes del error medio absoluto de las predicciones varió de 16,13 a 34,42%, dependiendo de la magnitud de la densidad.

Por otra parte, la exactitud del modelo está en función de la configuración que este tome, pues la magnitud de los errores depende de si considera el suelo como un material dilatante o no, además de la forma que toma la superficie de falla.

**TABLA 3. Estadísticos de Kolmogorov-Smirnov y error medio absoluto de las predicciones**

Simulación	Configuración del modelo	W (%)	$\gamma_d$ (g cm <sup>-3</sup> )	Estadístico DN estimado	Estadístico K-S bilateral para muestras grandes	Valor P aproximado	Error medio absoluto (%)
1	$\psi=\beta$ , K=0,80	27	1,05	0,63	1,25	0,08	17,63
2	$\psi=\beta$ , K=0,88	51	1,09	0,57	1,06	0,20	18,56
3	$\psi=\beta$ , K=0,89	40	1,05	0,55	1,17	0,08	10,26
4	$\psi=\beta$ , K=0,93	50	0,90	0,8	1,26	0,08	54,24
5	$\psi=\beta$ , K=0,89	33	1,10	0,42	0,80	0,56	4,14
6	$\psi=\beta$ , K=0,83	34	0,99	0,71	1,34	0,57	17,66
7	$\psi=\beta$ , K=0,84	34	1,05	0,6	0,95	0,34	18,96
8	$\psi=\beta$ , K=0,84	34	1,04	0,44	0,94	0,34	10,20
9	$\psi=\beta$ , K=0,80	21	1,19	0,71	1,34	0,06	17,50
10	$\psi=\beta$ , K=1	27	1,05	0,75	1,50	0,02	25,88
11	$\psi=\beta$ , K=1	51	1,09	0,57	1,07	0,20	12,83
12	$\psi=\beta$ , K=1	40	1,05	0,55	1,18	0,12	9,29
13	$\psi=\beta$ , K=1	50	0,90	0,8	1,26	0,08	35,67
14	$\psi=\beta$ , K=1	33	1,10	0,43	0,80	0,56	5,37
15	$\psi=\beta$ , K=1	34	0,99	0,6	0,95	0,33	14,73
16	$\psi=\beta$ , K=1	34	1,05	0,6	0,95	0,33	16,93
17	$\psi=\beta$ , K=1	34	1,04	0,43	0,80	0,56	12,24
18	$\psi=\beta$ , K=1	21	1,19	0,6	0,95	0,33	23,32
19	$\psi=0$ , K=0,80	27	1,05	0,6	0,95	0,33	34,42
20	$\psi=0$ , K=0,88	51	1,09	0,86	2,06	0,00	40,61
21	$\psi=0$ , K=0,89	40	1,05	0,58	2,65	0,00	19,21
22	$\psi=0$ , K=0,93	50	0,90	0,8	1,26	0,08	56,99
23	$\psi=0$ , K=0,89	33	1,10	0,75	1,50	0,02	11,67
24	$\psi=0$ , K=0,83	34	0,99	0,5	0,87	0,45	22,81
25	$\psi=0$ , K=0,84	34	1,05	0,75	1,50	0,02	31,04
26	$\psi=0$ , K=0,84	34	1,04	0,75	1,50	0,02	20,03
27	$\psi=0$ , K=0,80	21	1,19	0,43	0,80	0,56	16,13
28	$\psi=0$ , K=0,80-SH	27	1,05	0,6	0,95	0,33	31,75
29	$\psi=0$ , K=0,88-SH	51	1,09	0,7	1,94	0,27	29,85
30	$\psi=0$ , K=0,89-SH	40	1,05	0,5	0,71	0,66	10,31

Simulación	Configuración del modelo	W (%)	$\gamma_d$ (g cm <sup>-3</sup> )	Estadístico DN estimado	Estadístico K-S bilateral para muestras grandes	Valor P aproximado	Error medio absoluto (%)
31	$\psi=0$ , K=0,93-SH	50	0,90	0,8	1,26	0,08	40,70
32	$\psi=0$ , K=0,89-SH	33	1,10	0,37	0,75	0,62	11,74
33	$\psi=0$ , K=0,83-SH	34	0,99	0,5	0,87	0,44	19,32
34	$\psi=0$ , K=0,84-SH	34	1,05	0,67	0,82	0,53	10,09
35	$\psi=0$ , K=0,84-SH	34	1,04	0,4	0,63	0,82	18,15
36	$\psi=0$ , K=0,80-SH	21	1,19	0,2	0,32	1,00	16,24

Donde: SH, no se considera el trabajo del endurecimiento

Estos resultados evidencian que la exactitud del modelo Drucker Prager Extendido en la predicción de la respuesta mecánica del Vertisol objeto de estudio, depende del estado de humedad y densidad del suelo, así como de la configuración del modelo.

### Análisis de la influencia del contenido de humedad y densidad en el ajuste de las predicciones

El análisis de la influencia del contenido de humedad en la exactitud de las predicciones de la respuesta mecánica del Vertisol en estudio mostró (Figura 6), que el error medio absoluto tiende a decrecer su magnitud en la medida que aumenta la humedad del suelo hasta un determinado punto (33%), a partir del cual comienza a incrementar su valor, es decir los errores de las predicciones aumentan para humedades inferiores al límite plástico (24,9%), así como para humedades superiores al límite de adherencia (38%) de estos suelos.

De igual forma, al analizar la influencia que ejerce el estado de densificación del suelo sobre la exactitud de las predicciones, se observa que el error medio absoluto comienza a decrecer con el consiguiente aumento de la densidad, alcanzado los menores valores para una densidad media (1,10 g cm<sup>-3</sup>). A partir de este valor, se aprecia una ligera tendencia de incremento del error en las predicciones.

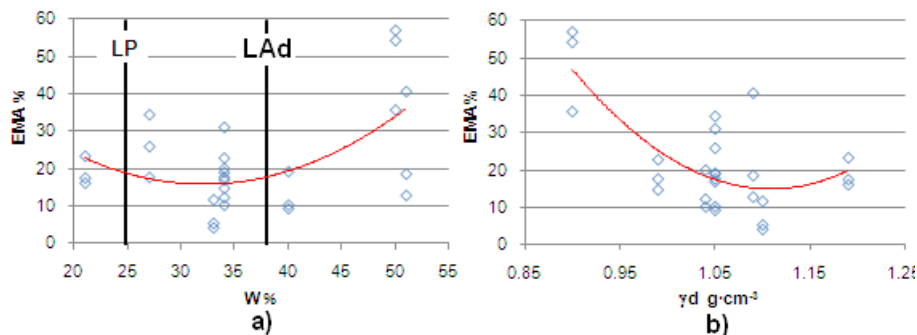


FIGURA 7. Variación del error medio absoluto en la predicción de los esfuerzos desviadores. a) EMA vs Humedad, b) EMA vs Densidad.

Estos resultados muestran que las predicciones más exactas en la simulación de la respuesta mecánica del Vertisol en estudio se obtienen para un rango de valores de humedad de 30 a 40% y densidad de 1,05 a 1,10 g cm<sup>-3</sup> respectivamente, es decir cuando el suelo posee valores de humedades y densidades medios. El modelo exhibió serias dificultades para predecir la respuesta mecánica de este suelo cuando el mismo se encuentra poco denso y con un elevado estado de humedad.

### Análisis de la influencia de la configuración del modelo en la exactitud de las predicciones

**Influencia del ángulo de dilatancia.** El análisis de la influencia de este parámetro en la exactitud de las predicciones mostró (Tabla 3), que la mayor exactitud se logró cuando el modelo se configuró considerando al suelo como un material dilatante ( $\psi=\beta$ ), independientemente del estado de humedad y densidad del mismo, así como de la configuración de la superficie de fluencia ( $k$ =calculado o  $k=1$ ).

Estos resultados difieren de los obtenidos por Herrera et al, (2008b) en un suelo Ferralítico rojo compactado, donde se demuestra que el modelo Drucker Prager Extendido es capaz de predecir las tendencias y valores de los esfuerzos desviadores determinados experimentalmente, independientemente de la condición de humedad y densidad, siempre que se considere al suelo como un material no dilatante ( $\psi=0$ ). De igual forma difiere de los resultados obtenidos por González (2011) para este mismo tipo de suelo para la condición de suelo húmedo (40%) en condiciones de alta humedad, donde se obtuvieron las predicciones más exactas cuando el modelo toma la siguiente configuración ( $\psi=0$ ) y ( $K=0,8$ ). Sin embargo, concuerda con los resultados obtenidos por este mismo autor, para la condición de suelo seco (20% de humedad), donde las predicciones más exactas se obtuvieron al considerar el suelo como un material dilatante ( $\psi=\beta$ ), independientemente de la configuración que tome la superficie de fluencia ( $K=0,8$  y  $K=1$ ).

Para el caso del suelo objeto de estudio este resultado está dado porque, una vez que se sobrepasaron los esfuerzos

desviadores máximos, el suelo comenzó a expandirse, o lo que es lo mismo el suelo se dilató provocando una reducción de la densidad y la consiguiente disminución de los esfuerzos desviadores, es por ello que cuando se considera el suelo como un material dilatante se alcanzan los resultados más exactos en las predicciones.

**Influencia de la forma de la superficie de fluencia.** La influencia de este parámetro en la exactitud de las predicciones está condicionada por el estado de humedad y densidad presente en el suelo, pues para los casos en los cuales el suelo se encuentra poco húmedo la mayor exactitud en las predicciones se obtiene cuando en el modelo el coeficiente K toma los valores calculados a partir de los ensayos experimentales ( $k=cal$ ) (Tabla 4), con independencia del estado de compactación del suelo. En los casos que el suelo posee un contenido de humedad medio, el modelo predice con exactitud la respuesta mecánica del suelo tanto para  $K=calculado$  como  $K=1$ , dependiendo de la densidad del suelo. La mayor exactitud se alcanzó cuando  $K=calculado$  y la densidad tomó valores  $\gamma_d=1,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Por último, al analizar la influencia de este parámetro para la condición de suelo húmedo, se obtuvo que la mayor exactitud en las predicciones tienen lugar cuando en el modelo  $K=1$ , independientemente del estado de densificación que presente el suelo.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en las investigaciones realizadas por Herrera (2006b), Herrera *et al.* (2008b) y González (2011), donde para el estado de suelo seco

la mayor exactitud se logra cuando la superficie de fluencia es convexa  $K=0,8$ . Sin embargo, para el estado de suelo húmedo los resultados difieren de los referidos por estos mismos investigadores, pues la mejor predicción se obtiene cuando la superficie de fluencia es el círculo de Von Mises  $K=1$ .

Los resultados evidencian que para la simulación del Vertisol el modelo de Drucker Prager Extendido se debe configurar en función del contenido de humedad y densidad presente, quedando establecido que para una humedad del 20 al 30% las predicciones más exactas se logran al considerar que el suelo fluye de manera asociada a la superficie de fluencia ( $\psi=\beta$ ) y el coeficiente que relaciona los esfuerzos desviadores (K) será igual al valor calculado. Para un contenido de humedad del 30 a 40% las predicciones serán más exactas al considerar que el suelo fluye de manera asociada a la superficie de fluencia ( $\psi=\beta$ ) y valor que tomara el coeficiente K para este rango de humedad estará en dependencia de la densificación del suelo. De igual forma, para humedades superiores al 40%, se considerará que el suelo fluye de manera asociada a la superficie de fluencia ( $\psi=\beta$ ), sin embargo el coeficiente que relaciona los esfuerzos desviadores debe tomar valores  $K=1$ , independientemente del estado de densificación, pues con esta configuración se obtienen las predicciones más exactas. Pues cuando se considera que el suelo fluye de manera no asociada ( $\psi=0$ ) a la superficie de fluencia e independientemente del valor que tome el coeficiente K, se presentaron imprecisiones numéricas que imposibilitaron la convergencia de las soluciones. (Tabla 4)

**TABLA 4. Error medio absoluto contra configuración del modelo Drucker Prager Extendido**

Humedad (%)	Densidad ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	EMA vs configuración del modelo (%)			
		( $\psi=\beta$ ) $K=cal$	( $\psi=\beta$ ) $K=1$	( $\psi=0$ ) $K=cal$	( $\psi=0$ ) $K=cal-SH$
W	$\gamma_d$				
27	1,05	17,50	25,88	34,42	31,75
51	1,09	18,56	12,83	40,61	29,85
40	1,05	10,26	9,29	19,21	10,31
50	0,90	54,24	35,67	56,99	40,70
33	1,10	4,14	5,37	11,67	11,74
34	0,99	17,66	14,37	22,81	19,32
34	1,05	18,96	16,93	31,04	10,09
34	1,04	10,20	12,24	20,03	18,15
21	1,19	17,50	23,32	16,13	16,24

**CONCLUSIONES**

- La exactitud del modelo Drucker Prager Extendido en la predicción de la respuesta mecánica del Vertisol, depende del estado de humedad y densidad del suelo, así como de la configuración del modelo.
- Los menores errores en las predicciones (4,14 a 31,04%) se obtuvieron, para un rango de valores de humedad de 30 a 40% y densidad de 1,05 a 1,10  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  respectivamente.
- El modelo exhibió serias dificultades para predecir la res-

- puesta mecánica de este suelo cuando el mismo se encuentra poco denso y con un elevado estado de humedad, por lo que se hace necesario seguir trabajando en la búsqueda de los parámetros necesarios para que prediga con exactitud.
- La configuración que predijo la relación esfuerzo-deformación con mayor exactitud fue cuando se consideró al suelo como un material dilatante ( $\psi=\beta$ ) y el coeficiente que relaciona los esfuerzos desviadores tomo los siguientes valores ( $k=calculado$  y  $k=1$ ).



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABO-ELNOR, M.; R. HAMILTON & J. T. BOYLE: "Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis", *Soil & Tillage Research*, 75(1): 61-73, 2004.
2. ABU-HAMED, N. H. & R. C. REEDER: "A nonlinear 3D finite element analysis of the soil forces acting on a disk plow", *Soil & Tillage Research*, (74): 115-124, 2003.
3. CAIRO, C. P. y G. QUINTERO: *Suelos, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1980.*
4. CERANA, J.; M. WILSON; O. POZZOLO; J. DE BATTISTA; S. RIVAROLA y S. SIONE: *Determinación de las Condiciones Físicas de los Vertisoles Orientadas al Manejo Sustentable*, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Paraná. Argentina, 2005.
5. CUBA. MINISTERIO DE LA AGRICULTURA: *Clasificación genética de los suelos de Cuba*, (Mapa 1: 25 000), Instituto de Suelos de Cuba, La Habana, 1999.
6. DAVOUDI, S.; R. ALIMARDANI; A. KEYHANI & R. ATARNEJAD: "A Two Dimensional Finite Element Analysis of a Plane Tillage Tool in Soil Using a Non-linear Elasto-Plastic Model", *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 3(3): 498-505, 2008.
7. DE LA ROSA, A. A. A.; M. HERRERA y O. GONZÁLEZ: "Propiedades macroestructurales de un vertisuelo requeridas para la simulación computacional de la interacción suelo-apero de labranza mediante el Método de Elementos Finitos (MEF).", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2): 56-59, 2011.
8. DE LA ROSA, A. A. A.: Influencia del estado de humedad y densificación en las propiedades macroestructurales de un vertisuelo para tres niveles de profundidad, **Memorias del III Congreso Cubano De Desarrollo Local. V Taller Internacional de Agricultura Sostenible y Biotecnología Vegetal**, 11-marzo 2011, Universidad de Granma, Granma, Cuba, 2011.
9. DE LA ROSA, A. A. A. y M. HERRERA: Determinación de las propiedades macroestructurales de un vertisuelo requeridas para la simulación computacional de la interacción suelo-apero de labranza mediante el método de elementos finitos. **Memorias del V Conferencia de Ingeniería Agrícola de La Habana**, 2 de julio 2010, Universidad Agraria de La Habana, Mayabeque, Cuba. 2010.
10. DE LA ROSA, A. A. A. y M. HERRERA: Influencia del estado de humedad y densificación en las propiedades macroestructurales de un Vertisol en tres niveles de profundidad. **Memorias del Congreso Internacional de Ciencias Agropecuarias**, 19-21 octubre 2011, Universidad Agraria de La Habana, Mayabeque, Cuba. 2011.
11. GONZÁLEZ, C. O.: *Modelación de la compactación provocada por el tráfico de neumáticos, de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio.*, 124pp., **Doctor**, Univesidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, 2011.
12. HERRERA, M.: *Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores*, 65pp., **Tesis (en opción al título de Master en Mecanización Agropecuaria)**, Universidad Agraria de la Habana, La Habana, Cuba, 2001.
13. HERRERA, M.: *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos*, 109pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Técnicas Agropecuarias)**, Universidad Agraria de La Habana, La Habana, Cuba, 2006a.
14. HERRERA, M.; M. CRUZ y M. FLORES: "Paratill C- 80 nuevo apero para la labranza conservacionista de los suelos cañeros", *Seminario Científico Conmemorativo por el 40 Aniv. del CEMA. Universidad Agraria de la Habana, dic. 4 y 5: 2008a.*
15. HERRERA, M.; C. IGLESIAS; M. RODRIGUEZ; A. GARCÍA DE LA FIGAL; R. DELGADO y M. FERNÁNDEZ: "Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores. Parte I", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3): 29-37, 2001a.
16. HERRERA, M.; C. IGLESIAS; M. RODRIGUEZ; A. E. GARCÍA DE LA FIGAL; R. DELGADO y M. FERNÁNDEZ: "Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores. Parte II", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3): 29-36, 2001b.
17. HERRERA, M.; C. E. IGLESIAS; O. GONZÁLEZ; E. LÓPEZ y A. L. SÁNCHEZ: "Simulación mediante el Método de Elementos Finitos de la respuesta mecánica de un Oxisol", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(4): 55-61, 2008b.
18. HERRERA, S. M.: *Empleo de nuevos materiales en la fabricación de órganos de trabajo para el laboreo de los suelos abrasivos, Informe de investigación terminada*, Proyecto Nacional Programa Nuevos materiales y Materiales de Avanzada, Co: B-27. Diciembre, 2006.": 2006b.
19. JAFARI, R.; T. TAVAKOLI; S. MINAEE & M. H. RAOUFAT: Large deformation modeling in soil-tillage tool interaction using advanced 3D nonlinear finite element approach. Proceedings of the **6th WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization**, September 22-24 2006, pp. 6, Lisbon, Portugal. 2006.
20. LEYVA, S. O.: *Fundamentación de una tecnología de laboreo mínimo de los suelos vertisoles basada en la aplicación de una máquina compleja en caña de azúcar*, 145pp., **Tesis (presenta en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias)**, Universidad Agraria de La Habana, Cuba, 2009.
21. LÓPEZ, M.: Estudio del comportamineto de losas compuestas con lámina colaborante mediante la combinación de técnicas de experimentación y simulación numérica., Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, Cuba, 2010.
22. RODRÍGUEZ, J.; Y. SUÁREZ y M. DESCHAPELLES: El subsolador SP-280H modificado, nuevo equipo para la labranza mínima de los suelos. Estación de Investigación de la Mecanización Cañera del INICA. Quivicán. La Habana, Cuba, 1990.
23. XIANG-RONG, Z. & W. JIN-CHANG: "Introduction to partly soil models in ABAQUS Software and their application to the geotechnical engineering", *Rock and Soil Mechanics*, 25(2): 145-148, 2004.