VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Efecto del tubo de descarga en la uniformidad de siembra de un dosificador neumático de semillas

Effect of the seed delivery tube on the seeding uniformity of a Pneumatic seed metering device

Kati Chavez[1], Aram Vladimir Rangel Montes[1], Alberto Saldaña Robles[2], Noe Saldaña Robles[2], Antonio Bustos Gaytan[2*]

[1]Licenciatura en ingeniería Agrónica. División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Ex Hacienda El Copal k.m. 9; carretera Irapuato-Silao; Irapuato, Gto., México.

[2]Departamento de Ingeniería Agrícola. División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Ex Hacienda El Copal k.m. 9; carretera Irapuato-Silao; Irapuato, Gto., México.

*adj.bustos@ugto.mx

Resumen

La siembra es una de las etapas más importantes en la producción agrícola, ya que de ella depende el establecimiento adecuado del cultivo y su rendimiento. Para lograr una germinación eficiente y un crecimiento homogéneo, las semillas deben depositarse con precisión en el suelo, respetando la profundidad y el espaciamiento definidos. Con el fin de mejorar la exactitud en la distribución de semillas, las sembradoras modernas han incorporado sistemas neumáticos automatizados que utilizan vacío para captar semillas individuales mediante los orificios del plato de siembra y liberarlas posteriormente a través de tubos de descarga. Los Distribuidores Neumáticos de Semillas (DNS) combinan flujo de aire y elementos mecánicos para transportar las semillas del plato de siembra hasta el suelo. Durante este proceso, los tubos de descarga desempeñan un papel fundamental, ya que pueden influir en la velocidad, trayectoria y posición final de las semillas. Entre los factores que afectan el desempeño del sistema destacan las características geométricas del tubo, particularmente su forma, diámetro y longitud. Entre las configuraciones más utilizadas se encuentran los tubos rectos y curvos. Mientras que los tubos rectos favorecen una trayectoria más directa, los tubos curvos pueden modificar el comportamiento de la semilla debido a los cambios de dirección y al contacto con las paredes internas del conducto. En este contexto, la presente investigación evalúa en condiciones similares un tubo recto y un tubo curvo, con el objetivo de analizar el efecto de la geometría del tubo de descarga sobre la uniformidad de la distribución de semillas de maíz. Los resultados permitirán identificar la configuración con mejor desempeño y aportar información para optimizar la precisión y eficiencia de los sistemas neumáticos de siembra.

Palabras clave: Siembra de precisión; sembradoras; maíz; dosificador neumático.

Introducción

La siembra constituye una de las operaciones más importantes dentro de la producción agrícola, ya que de ella depende el establecimiento adecuado del cultivo y, en consecuencia, el rendimiento final. Una distribución uniforme de las semillas favorece una emergencia homogénea de las plantas, reduce la competencia por agua, nutrientes y luz, y mejora el aprovechamiento de los recursos disponibles (Karayel *et al.,* 2024). Cuando las semillas se depositan con la separación y profundidad adecuadas, el cultivo presenta un desarrollo más uniforme, lo que se traduce en un incremento del rendimiento y una mayor eficiencia en el uso de los insumos agrícolas (Yadav *et al.,* 2025). Por ello, la calidad de la siembra representa un factor determinante para alcanzar altos niveles de producción.

Con el objetivo de incrementar la precisión y eficiencia de las operaciones de siembra, las sembradoras han evolucionado desde mecanismos puramente mecánicos hacia sistemas automatizados capaces de controlar con mayor exactitud la dosificación, liberación y colocación de las semillas. Estos avances permiten mantener espaciamientos más uniformes, profundidades de siembra adecuadas y poblaciones de plantas óptimas, contribuyendo a un mejor establecimiento del cultivo. Entre las tecnologías disponibles, las sembradoras neumáticas destacan por su elevada precisión, ya que utilizan diferencias de presión de aire para sujetar, individualizar y distribuir las semillas de manera controlada. Por medio de este principio de funcionamiento,

estos sistemas reducen la ocurrencia de semillas dobles y espacios vacíos, mejorando la uniformidad de siembra y el incremento en la producción.

Dentro de las sembradoras neumáticas, uno de sus componentes principales es el Distribuidor Neumático de Semillas por Vacío (DNSV) (Bustos *et al.,* 2025). Este mecanismo funciona mediante una diferencia de presión que permite sujetar individualmente cada semilla sobre los orificios del plato de siembra. Conforme el plato de siembra gira, las semillas son transportadas hasta la zona de descarga, donde se corta el vacío y las semillas son liberadas para iniciar su recorrido hacia el suelo. Por medio de este sistema es posible reducir la presencia de semillas dobles y espacios vacíos, incrementando la uniformidad de siembra y mejorando el establecimiento del cultivo. Una vez liberada por el distribuidor neumático, la semilla desciende a través del tubo de descarga de semillas (TDS), componente ubicado en la parte inferior del distribuidor y cuya función consiste en conducir la semilla hasta el surco de siembra procurando conservar la separación establecida por el mecanismo dosificador. Los diseños más utilizados corresponden a tubos rectos y tubos curvos, los cuales presentan diferentes características geométricas que pueden modificar la velocidad, dirección y trayectoria de caída de las semillas antes de su colocación final en el suelo.

Sin embargo, la uniformidad de siembra no depende únicamente del desempeño del distribuidor neumático de semillas. Durante el recorrido dentro del tubo de descarga pueden presentarse impactos de la semilla contra las paredes internas, rebotes, cambios en la velocidad de caída y alteraciones en su trayectoria, fenómenos que modifican el espaciamiento originalmente generado por el mecanismo dosificador. Así mismo, el incremento de la velocidad de operación de la sembradora puede intensificar estos efectos, provocando una disminución en la precisión de la distribución de las semillas. Por esta razón, la geometría del tubo de descarga representa un elemento clave en el desempeño del sistema de siembra y debe evaluarse a la par con el distribuidor neumático. Diversos investigadores han estudiado el efecto de los tubos de descarga sobre la uniformidad de siembra. Karayel (2009) reportó que las interacciones entre la semilla y las paredes internas del tubo modifican la trayectoria de caída y afectan el espaciamiento entre semillas, especialmente cuando aumenta la velocidad de operación. Por su parte, Yazgi (2016) evaluó distintas configuraciones de tubos de descarga y concluyó que la longitud, el diámetro, la inclinación y la curvatura influyen significativamente en la uniformidad de distribución, observando que los tubos rectos favorecen trayectorias más estables que los tubos curvos. Así mismo, Kachman & Smith (1995) desarrollaron criterios para evaluar la calidad de la siembra mediante los índices de aceptables, dobles y vacíos, demostrando que una distribución uniforme de semillas se relaciona directamente con una emergencia homogénea del cultivo y un mayor potencial de rendimiento. Con base en estos antecedentes, el objetivo de la presente investigación es evaluar experimentalmente la trayectoria de caída de las semillas dentro de dos modelos de tubos de descarga, uno recto y otro curvo, adaptándolos en un distribuidor neumático de semillas, y relacionar dichas trayectorias con la uniformidad de siembra obtenida bajo diferentes velocidades de operación, con la finalidad de identificar la configuración que proporciona un mejor desempeño durante el proceso de siembra.

Materiales y métodos

Funcionamiento del Distribuidor Neumático de Semillas

Los Distribuidores Neumáticos de Semillas por Vacío (DNSV) son una excelente opción para la siembra de precisión, debido a su alta capacidad para dosificar semillas de manera uniforme y a su relativa simplicidad de operación. El esquema de funcionamiento de este mecanismo se basa en cuatro etapas principales: 1) Etapa de llenado: las semillas son sujetadas por acción del flujo de aire en los orificios del plato de siembra, 2) Etapa de limpieza o individualización: se elimina el exceso de semillas que se han sujetado, buscando el paso de una sola semilla a través del mecanismo de limpieza, 3) Etapa de acarreamiento: las semillas individualizadas son transportadas hasta la siguiente etapa y 4) Etapa de lanzamiento: por corte del flujo de aire, las semillas son lanzadas y depositadas en el suelo o dentro de los tubos de descarga. En la Figura 1a se muestra un ejemplo de distribuidor neumático de semillas por vacío con sus componentes principales, y en la Figura 1b se muestra un esquema general de su funcionamiento de acuerdo con las cuatro etapas descritas.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

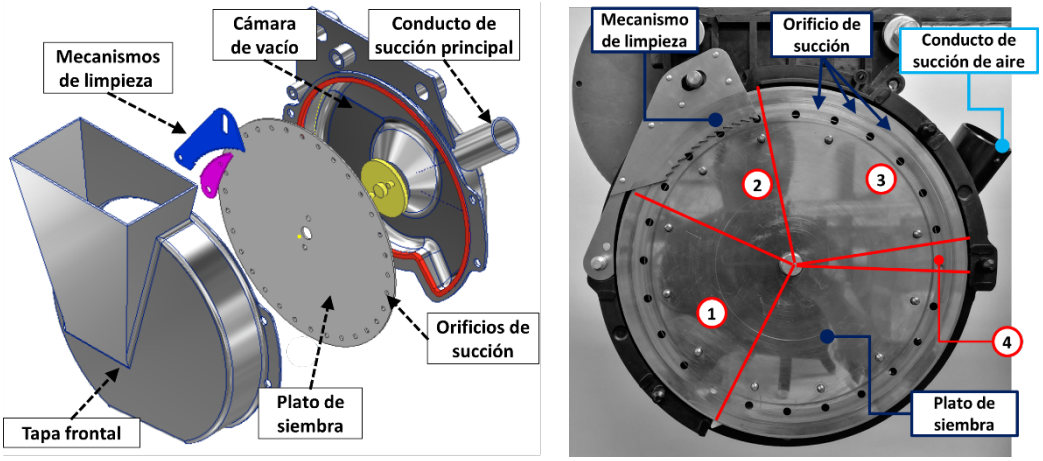

Figura 1. a) Esquema general de los componentes clave de un DNSV y b) diagrama de las cuatro etapas de funcionamiento de un DNSV.

El tubo de descarga de semillas (TDS) se ubica en la parte inferior del DSNV y su función es conducir la semilla desde el DNSV al suelo. Los principales modelos de TDS encontrados en equipos de siembra son los TDS curvos y los TDS rectos. En este estudio se consideraron ambos tipos de TDS con la finalidad de analizar el efecto de sus geometrías sobre la trayectoria de caída de las semillas dentro de los TDS, y su influencia sobre la uniformidad de siembra. Para este estudio, se construyó un TDS curvo y uno recto de acuerdo con dimensiones similares de tubos comerciales. Para su fabricación se utilizó manufactura aditiva empleando una impresora Flashforge Guider II y filamento PLA. En la construcción de estos, se consideró una tapa lateral transparente de acrílico, para observar la caída de las semillas cuando descienden por él. En la Figura 2 se muestran los modelos de TDS curvo y rectos utilizados y los modelos desarrollados para su manufactura.

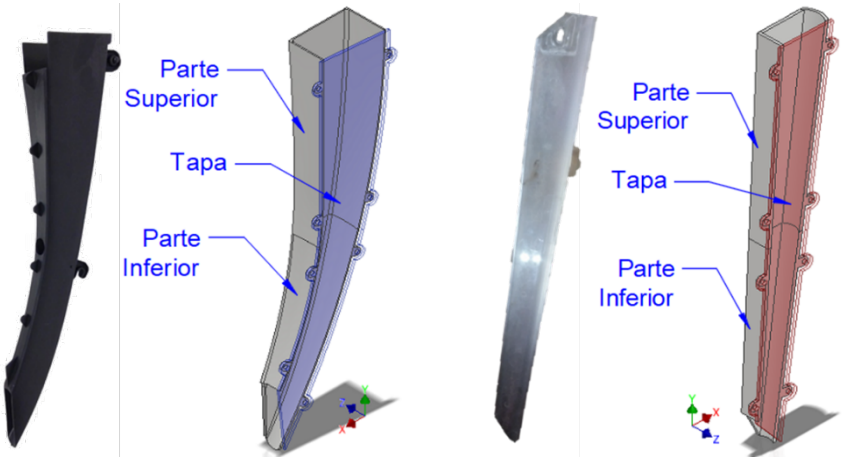

Figura 2. Modelos de TDS, así como la segmentación para la construcción mediante manufactura aditiva (impresión 3D) para el estudio de la trayectoria y uniformidad de siembra, a) TDS curvo y b) TDS recto.

Evaluación experimental de las trayectorias de las semillas y la uniformidad de siembra

Las pruebas experimentales para evaluar la trayectoria de caída de las semillas y la uniformidad de siembra se realizaron a nivel laboratorio en un banco para pruebas de siembra de la Universidad de Guanajuato, en el cual es posible evaluar la uniformidad de siembra de DNSV empleando herramientas de visión artificial. Para ello, empleando una cámara de video de alta velocidad (DJI Osmo Action) a 240 fps, se graba la caída de las semillas dentro del TDS y mediante un código de programación se realiza el seguimiento de las posiciones de las semillas cuando descienden y se estima la distancia entre ellas. Adicionalmente, mediante una fuente luminosa proyectada hacia el TDS se genera un contraste entre la semilla utilizada y el fondo del TDS que es de color negro, lo cual permite extraer las trayectorias de las semillas. En la Figura 3a se muestra la configuración del banco de pruebas para grabar la trayectoria de caída de las semillas con la cámara de alta velocidad, y en la Figura 3b se muestra una imagen del paso de las semillas por cada uno de los TDS.



Figura 3. a) Montaje del banco de pruebas para la captura en video de la caída de las semillas dentro de los TDS y b) ejemplo del paso de las semillas dentro del TDS curvo y recto.

El código de programación para el análisis de la caída de las semillas y la estimación de la distancia entre semillas se desarrolló utilizó el lenguaje de programación Python y librerías de OpenCV, el cual consta de la siguiente estructura: 1) Lectura de video, 2) recorte de la zona de interés mediante un mascara que delimita cada uno de los TDS, 3) extracción de la capa roja de la imagen, 4) binarización de la imagen para segmentar la semilla dentro del TDS, 5) delimitación del borde y centroide geométrico de las semillas mediante operaciones morfológicas, 6) registro de las posiciones de las semillas al descender, 7) registro del tiempo y posición de las semillas cuando pasan por la línea de referencia para estimar la distancia entre semillas y 8) cálculo de las distancias entre semillas considerando la velocidad de operación teórica del DNSV y el registro de la posición de las semillas sobre la línea de referencia.

Mediante la metodología anterior es posible contar con el registro de las posiciones de cada una de las semillas dentro del TDS y observar la variabilidad de las trayectorias de caída de las semillas, así como la trayectoria promedio. Para ello todas las posiciones registradas en los TDS se dividieron en 14 segmentos, y se estimó el promedio de las posiciones dentro de cada segmento, registrando en una imagen el punto medio. Finalmente se unen los puntos medios y se obtiene la trayectoria promedio de todas las semillas para cada TDS.

Las pruebas se realizaron empleando semilla variedad Cimarrón de la marca Asgrow, con una presión de vacío calibrada en el DNSV de 6.7 kPa y una distancia teórica entre semillas calibrada a 12 cm. Adicionalmente se consideró en el estudio el efecto de la velocidad de operación del DNSV, ya que este factor junto con el TDS puede afectar la trayectoria y la uniformidad de siembra, por lo tanto, se emplearon las velocidades de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 km/h.

La evaluación de la uniformidad de siembra se realizó con base en la norma ISO 7256/1 (International Organization for Standardization, 1984), que establece los criterios de evaluación y clasificación de la

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

siembra. Esta norma se basa en comparar las distancias entre semillas teórica (*Dt*) y las distancias entre semillas real o medida (*Dr*), clasificándola las semillas como aceptables, dobles y vacíos. De acuerdo con el siguiente criterio: $0.5Dt \leq Dt \leq 1.5Dt$, que de acuerdo con la *Dt* de 12 cm, se considera aceptable cuando se tiene una distancia entre semillas de entre 6 y 18 cm, dobles cuando están por debajo de 6 cm y vacíos cuando superan los 18 cm. A partir de una muestra de 250 semillas, se estiman los índices de aceptables (I_A), dobles (I_D) y vacíos (I_V) de acuerdo con las siguientes ecuaciones (1), (2) y (3), respectivamente.

$$I_A = \frac{N_A}{N} \times 100 \quad (1)$$

$$I_D = \frac{N_D}{N} \times 100 \quad (2)$$

$$I_V = \frac{N_V}{N} \times 100 \quad (3)$$

Resultados y discusión

Resultados de las trayectorias de caída de las semillas

Los resultados de las trayectorias de caída de las semillas para cada uno de los TDS, correspondientes a velocidades de avance de 4 a 12 km/h, se presentan en la Figura 4. Los puntos de color blanco representan las posiciones instantáneas de las semillas durante su descenso dentro del TDS para la muestra de las 250 semillas. Los puntos de color rojo corresponden al centroide promedio de las posiciones de las semillas, calculado a partir de la división de la trayectoria en 14 segmentos. Finalmente, la línea de color azul une estos centroides medios, representando la trayectoria promedio de caída de las semillas. Esta representación permite visualizar tanto la variabilidad de las trayectorias, reflejada en la dispersión de los puntos blancos, como la tendencia general del movimiento de las semillas, descrita por la trayectoria media definida por los centroides y la línea azul.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

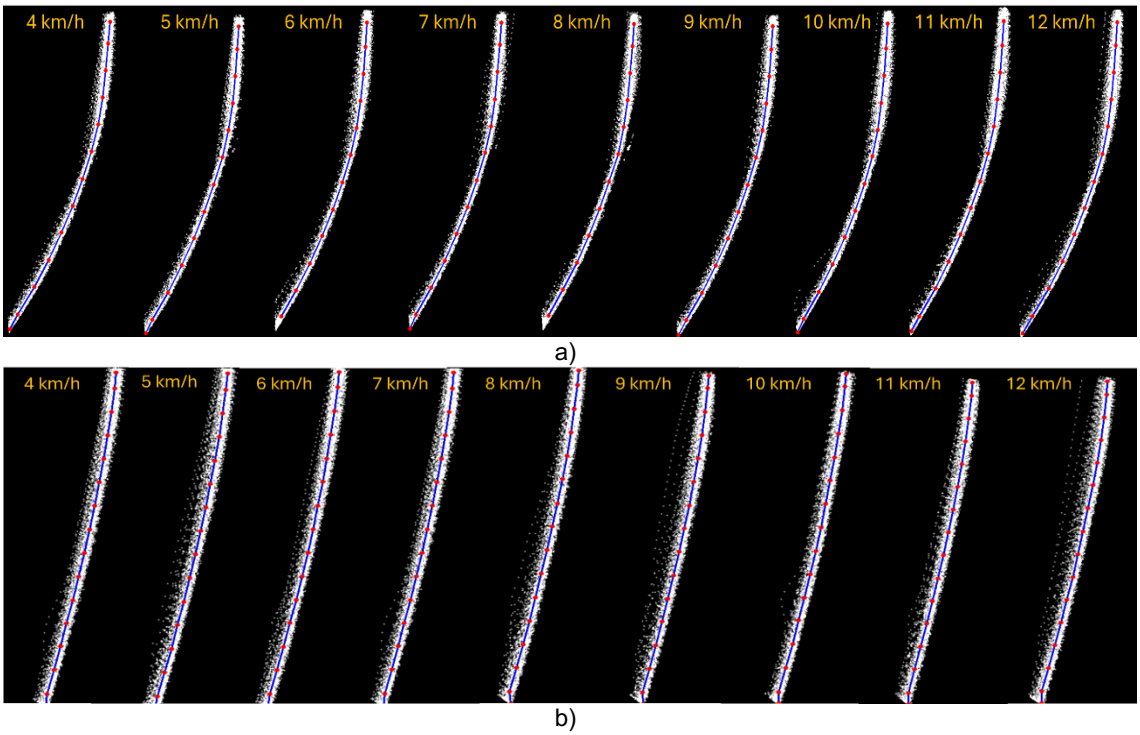

Figura 4. *Resultados de trayectorias de los TDS, a) curvo y b) recto.*

Las trayectorias correspondientes al TDS curvo (Figura 4a) muestran que, desde la parte superior hasta alrededor de la mitad del tubo, existe una mayor dispersión de las semillas. Este comportamiento se atribuye a la variabilidad inherente con la que el DSNV libera las semillas al inicio de su descenso. Sin embargo, a partir de la zona media del TDS, las trayectorias convergen, reduciendo significativamente su dispersión debido al efecto de guiado que ejerce la curvatura del tubo. Desde este punto y hasta la salida, las trayectorias permanecen prácticamente estables, presentando una variabilidad mínima. Así mismo, se observa que el incremento de la velocidad de operación de 4 a 12 km/h no produce un aumento apreciable en la dispersión de las trayectorias dentro del TDS curvo. Por el contrario, el diseño curvo mantiene un comportamiento consistente en todo el intervalo de velocidades evaluado, evidenciando un efecto de estabilización sobre el movimiento de las semillas durante su descenso.

Por otro lado, las trayectorias correspondientes al TDS recto (Figura 4b) muestran que la dispersión de las semillas se mantiene prácticamente constante a lo largo de todo el tubo, sin evidenciar una zona en la que las trayectorias converjan o se estabilicen, como ocurre en el TDS curvo. Este comportamiento sugiere que una proporción importante de las semillas desciende sin entrar en contacto con las paredes del TDS, conservando la variabilidad inicial con la que fueron liberadas por el DSNV. Sin embargo, para las velocidades de 8 a 12 km/h se observan trayectorias atípicas, algunas de las cuales se originan desde la parte superior del tubo y otras desde su sección media. Estas desviaciones indican que el TDS recto puede inducir cambios en la trayectoria de las semillas, posiblemente como consecuencia de los impactos de las semillas contra las paredes internas del tubo durante su descenso. Estos fenómenos generan modificaciones localizadas en el movimiento de las semillas, incrementando la variabilidad de sus trayectorias. Con el propósito de comprender mejor el efecto de las trayectorias de caída de las semillas en los TDS curvo y recto, estos resultados se contrastaron con el nivel de uniformidad de siembra, de acuerdo con la clasificación de la norma ISO 7256/1 y parámetros adicionales como la media y la desviación estándar de la distancia media entre semillas. Este análisis se muestra en la siguiente sección.

Resultados de uniformidad de siembra de los TDS

En la Tabla 1, se muestra un resumen de la uniformidad de siembra en términos de índices de aceptables, dobles y vacíos, así como la media y la desviación estándar de la distancia entre semillas real (*Dr*), de acuerdo con las velocidades evaluadas de 4 a 12 km/h para cada TDS.

Los resultados muestran que el desempeño de ambos tubos de descarga de semillas (TDS) estuvo influenciado por la velocidad de operación. En el TDS curvo, el porcentaje de siembras aceptables se mantuvo entre 72.4 y 78.4% para velocidades de 4 a 9 km/h, disminuyendo drásticamente al aumentar la velocidad hasta alcanzar 33.2% a la velocidad 12 km/h. Este comportamiento estuvo acompañado por un aumento de los espacios vacíos, que pasaron de valores cercanos entre 22 a 27 % de 4 a 9 km/h hasta 66 % para 12 km/h. Por su parte, el TDS recto presentó una respuesta más estable, alcanzando los mayores porcentajes de aceptables entre las velocidades 8 a 10 km/h (entre 77.2 y 79.2%). En cuanto a las distancias medias entre semillas se mantuvieron similares en ambos tubos de descarga de semilla para las velocidades de 4 a 9 km/h, aunque el TDS curvo mostró una mayor variación a velocidades elevadas (10 a 12 km/h), alcanzando 38.81 cm a la velocidad de 12 km/h. La desviación estándar aumentó con la velocidad en ambos diseños, reflejando una menor uniformidad en la deposición de semillas. Los resultados en este estudio muestran que ambos tubos presentan un desempeño similar en velocidades de 4 a 8 km/h, mientras que el TDS recto presentó una mejor calidad de siembra a velocidades de 9 a 12 km/h.

***Tabla 1**. Resultados de los índices de aceptables, dobles y vacíos, así como la distancia media y su respectiva desviación estándar para los TDS curvo y recto.*

Velocidad	TDS curvo					TDS recto				
	Aceptables [%]	Dobles [%]	Vacíos [%]	Distancia media [cm]	Desviación estándar [cm]	Aceptables [%]	Dobles [%]	Vacíos [%]	Distancia media [cm]	Desviación estándar [cm]
4	78.4	0.0	21.6	16.79	1.54	66.0	0.8	33.2	17.41	1.50
5	72.8	1.2	26.0	17.39	1.57	69.6	0.4	29.6	17.04	1.50
6	76.0	0.4	23.6	16.53	1.74	72.8	0.0	27.2	17.85	1.36
7	76.0	0.8	23.2	17.44	1.89	72.0	1.2	26.4	17.20	1.74
8	76.0	0.4	23.6	16.45	1.72	77.2	0.0	22.8	17.34	1.64
9	72.4	0.8	26.8	16.13	1.92	78.8	0.0	21.2	17.08	1.87
10	51.6	0.8	47.6	21.43	1.87	79.2	0.4	20.4	16.30	1.94
11	45.2	0.8	54.0	27.92	1.90	75.2	0.4	24.4	18.71	2.18
12	33.2	0.4	66.0	38.81	2.63	41.6	1.6	56.4	30.50	2.25

En la Figura 5 se presenta el comportamiento del índice de aceptables de ambos TDS en función de la velocidad de operación. A 4 km/h, el TDS curvo registra un índice de aceptables superior al del TDS recto. Entre 5 y 8 km/h, ambos diseños muestran un comportamiento similar, con valores comprendidos entre alrededor de 73 y 78 %, sin diferencias relevantes en su desempeño. Sin embargo, a partir de 9 km/h las tendencias difieren significativamente. En el TDS curvo, el índice de aceptables disminuye de forma progresiva conforme aumenta la velocidad de operación, alcanzando su valor mínimo a 12 km/h. Por el contrario, el TDS recto mantiene un índice de aceptables cercano al 79 % entre 9 y 10 km/h, presenta una ligera disminución a 11 km/h y una reducción más pronunciada para 12 km/h. Estos resultados indican que ambos TDS proporcionan un desempeño comparable para velocidades de operación de hasta 8 km/h. No obstante, para velocidades superiores, el TDS recto conserva una mayor uniformidad de siembra, evidenciada por un índice de aceptables más elevado que el del TDS curvo.

Al relacionar estos resultados con las trayectorias de las semillas (Figura 4), se observa que el TDS recto presenta una mayor uniformidad de siembra debido a que las semillas prácticamente no entran en contacto

con sus paredes internas durante el trayecto. En contraste, en el TDS curvo las semillas impactan en la parte media del tubo y posteriormente se deslizan sobre su superficie hasta la salida, lo que puede generar variaciones en su velocidad y dirección, afectando la uniformidad de colocación. Aunque la ausencia de contacto en el TDS recto parece representar una ventaja, este comportamiento también puede resultar desfavorable si no existe un acoplamiento adecuado con el dosificador de semillas de nueva generación (DSNV). Así mismo, si el ángulo de lanzamiento de las semillas proveniente del DSNV difiere significativamente del ángulo de entrada del TDS recto, pueden producirse rebotes internos contra las paredes del tubo, alterando las trayectorias esperadas y reduciendo la precisión de la distribución de las semillas en el surco.

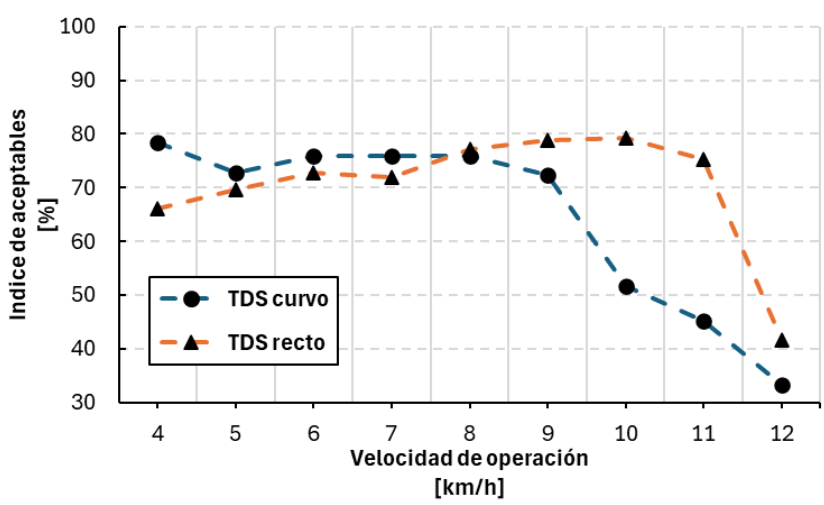

Figura 5. Comportamiento del índice de aceptables para el TDS curvo y TDS recto.

Conclusiones

Un estudio experimental de las trayectorias de caída de semillas dentro de dos modelos de tubos de descarga de semillas empleados comúnmente en equipos de siembra se llevó a cabo, además se evaluó el nivel de uniformidad de siembra de cada uno de ellos bajo distintas velocidades de operación de 4 a 12 km/h. Los resultados se contrastaron para identificar el efecto de sus geometrías sobre la trayectoria de caída y la uniformidad de siembra. De los resultados obtenidos en la investigación se derivan las siguientes conclusiones:

Aunque ambos tubos de descarga de semillas presentaron, en términos generales, un comportamiento similar en la uniformidad de siembra para velocidades de operación entre 4 y 8 km/h, la geometría del tubo influyó significativamente en el desempeño cuando la velocidad fue superior a 8 km/h. Para las condiciones experimentales de este estudio, cualquiera de los dos diseños puede emplearse para operar el DNSV en el intervalo de 4 a 8 km/h. Sin embargo, para velocidades superiores a 8 km/h, el tubo recto proporcionó una mayor uniformidad de siembra, por lo que constituye la alternativa más conveniente para estas condiciones de operación.

La geometría curva del tubo de descarga de semillas actúa como un elemento estabilizador de las trayectorias de caída de las semillas, reduciendo su dispersión en la zona donde estas entran en contacto con la curvatura del tubo. No obstante, este efecto de estabilización no se traduce necesariamente en una mayor uniformidad de siembra. El contacto de las semillas con las paredes internas del tubo puede modificar su velocidad y dirección, alterando el tiempo de salida y el espaciamiento entre semillas durante su deposición, lo que puede repercutir negativamente en la uniformidad de la distribución.

Referencias

Abdolahzare, Z., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2018). Real time laboratory and field monitoring of the effect of the operational parameters on seed falling speed and trajectory of pneumatic planter. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 187–198. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.001

Bustos-Gaytán, A., Saldaña-Robles, N., Joya-Cárdenas, D. R., Gutiérrez-Vaca, C., Alfaro-Ayala, J. A., Barco-Burgos, J., & Saldaña-Robles, A. (2025). Advancements in pneumatic seed-metering devices: A review of numerical and experimental approaches. *Results in Engineering*, 26, 105626. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105626

International Organization for Standardization (ISO). (1984). Sowing equipment: Test methods — Part 1: Single seed drills (precision drills) (ISO 7256-1:1984). ISO: Geneva, Switzerland.

Kachman, S. D., & Smith, J. A. (1995). Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering. *Transactions of the ASAE*, 38(2), 379–387. https://doi.org/10.13031/2013.27843

Karayel, D. (2009). Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean. *Soil and Tillage Research,* 104(1), 121–125. https://doi.org/10.1016/j.still.2008.12.001

Karayel, D., Jotautienė, E., Šarauskis, E., Rossi, S., Rubio Scola, I., & Bourges, G. (2024). Evaluation of monitoring systems for seeder seed spacing uniformity. *Journal of International Scientific Publications: Agriculture & Food*, 12, 105–116. https://doi.org/10.62991/AF1996556881

Yadav, D. K., Singh, J., & Kumar, P. (2025). Precision planting and seeding: A review of technologies and techniques. *International Journal of Research in Agronomy,* 8(4), 548–551. https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i4g.2830

Yazgi, A. (2016). Effect of seed tubes on corn planter performance. *Applied Engineering in Agriculture*, 32(6), 783–790. https://doi.org/10.13031/aea.32.11274