



Sistema de autoguiado EZ-Pilot Pro de Trimble



Pilar Barreiro, Belén Diezma, Miguel Garrido Izard, Constantino Valero.

LPF_TAGRALIA, UPM_CEI Moncloa.

El pasado día 3 de abril acometimos este ensayo para verificar en campo, tanto en estático como en dinámico, las posibilidades del sistema de autoguiado EZ-Pilot Pro de Trimble distribuido por Vantage Ibérica Occidental. Se ha verificado la precisión con señal DGPS Egnos y RTK con estación base a 5 km y se han programado cabeceras en modo completamente automático para establecer sus prestaciones respecto al trabajo manual. Los resultados más relevantes se muestran a continuación.

Máxima precisión

En este ensayo, realizado el día 3 de abril, hemos trabajado con personal técnico de Vantage Iberia Occidental, que forma parte de la red de distribuidores oficiales especializada en los productos y soluciones de Trimble para la agricultura de precisión, junto con el concesionario Comercial JL Nombela situado en Gerindote (Toledo). La red Vantage ofrece los productos y soluciones de Trimble y asesoramiento en agricultura de precisión independientemente de la marca de maquinaria que utilice el cliente. Integra la comercialización de dispositivos y el asesoramiento con servicios agronómicos y de manejos de datos. La compañía cuenta con una red propia de estaciones RTK que sus clientes pueden utilizar de forma gratuita.

Autoguiado EZ-Pilot Pro

El guiado automático EZ-Pilot Pro con el controlador de guiado NAV-900 y el monitor GFX-750 son los elementos que componen el sistema de guiado evaluado en este ensayo. El sistema EZ-Pilot Pro gira el volante, a través de su motor eléctrico compacto, utilizando las indicaciones de los dispositivos Trimble para mantener la trayectoria deseada; se integra directamente en la columna de dirección y permite la conducción manual sin restricciones cuando la dirección asistida no está activada.

El controlador NAV-900 es fácil de instalar en el techo de la maquinaria y ocupa poco espacio en la cabina; posee las prestaciones de un receptor GNSS multiconstelación (GPS, Glonass, Galileo, BeiDou) permitiendo un tiempo de convergencia RTX más rápido.

Este sistema de guiado se mantiene activo al detenerse la máquina y permite mantener el guiado activado en marcha atrás durante 15 segundos para poder alinear la siguiente pasada de la máquina, funcionalidad relevante en parcelas pequeñas en las que se cultiva todo el terreno.

La pantalla táctil de alta resolución de 10,1 pulgadas (25,6 cm) es compatible con Isobus, lo que permite su uso en una flota de tractores multimarca y posibilita el control de múltiples máquinas e implementos independientemente de su fabricante con una única pantalla. El sistema operativo de esta pantalla está basado en Android, lo que permite a los usuarios la personalización de la forma en que trabajan con la pantalla.

La transferencia entre vehículos es sencilla y dispone de una buena conectividad a través de Wi-Fi y Bluetooth. El monitor dispone también de una cámara integrada compatible con una cámara adicional externa.

Los cuadros I, II y III resumen respectivamente las características de la pantalla GFX-70, del guiado NAV-900 y del receptor GNSS.

CUADRO I

Especificaciones de la pantalla GFX-750.

Resolución	1.280 x 800
Tamaño (diagonal)	25,6 cm (10,1")
Brillo	900 (candela/m ²)
Procesador del sistema	Procesador con 4 núcleos iMx6 PLUS @ 1 GHz
Almacenamiento (eMMC/RAM)	16 GB/1 GB
GNSS interno	No
Dimensiones	Largo 263 mm x ancho 182 mm x profundidad 45 mm (en la correa del conector)
Peso	2 kg
Normativa medioambiental	IP66
Puerto de comunicaciones	Sí
Resolución cámara (Megapíxeles)	1.0 Megapíxeles, 720 p
Conexiones	
Alimentación/CAN	Deutsch DT15-6p
USB (orientación en 2 lados)	USB 2.0 Tipo A (1 anfitrión, 1 OTG)
Bluetooth	Bluetooth 4.1

CUADRO II

Especificaciones del controlador de guiado NAV-900.

Caja y dimensiones físicas	
Tamaño	213 x 213 x 80 mm
Peso	1,2 kg
Soportes de montaje	Soporte personalizado Trimble
Alimentación	
Alimentación	9 - 16 VDC, 5,5 W 17,5 W con los accesorios externos conectados
Potencia de salida	Corriente máxima de 12 VDC, 12 W para la radio externa: 1 A
Conectores	
A la pantalla GFX-750	Conector M12 de 4 pines
A la radio externa	Conector M12 de 5 pines
Para entrada/salida	Conector Deutsch de 12 pines
Condiciones de operación	
Humedad	Hasta 100% de humedad relativa, con condensación
Protección contra la entrada de partículas	IP66, a prueba de polvo, impermeable, IPx9K
Comunicación y entrada/salida	
Bluetooth	Bluetooth 4.1
Puertos serie	1 Tx/Rx, 1 de solo Tx
Puertos CAN	2
BroadR-Reach	Puerto: 1
Salida digital	Sonalert
Entrada analógica	Activación remota
Salida NMEA	1, 5, 10 Hz
Unidad de Medición Inercial (IMU)	
Giroscopio	3 ejes, 200 Hz
Acelerómetro	3 ejes, 200 Hz

CUADRO III

Especificaciones del receptor GNSS.

Constelaciones	GPS: L1 C/A, L2C, L2E, L5. GLONASS: L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P, L3 CDMA. Galileo: E1, E5AltBOC. BeiDou (COMPASS): B1, B2.
Correcciones de satélites	CenterPoint RTX Fast. CenterPoint RTX. RangePoint RTX. SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS). xFill
Correcciones basadas en tierra	CenterPoint RTK. CenterPointVRS
Formatos de corrección	CMR+, sCMR+, sCMR+ con SecureRTK, CMRx, RTCM 3.0, RTCM 3.1, RTCM 3.2
Guiado	
Eléctrico	Sistema con motor de accionamiento Autopilot
Listo para el guiado	CANBus J1939
Hidráulico	NAV III Autopilot externo

En este ensayo hemos trabajado los formatos de corrección SBAS (corrección Egnos, + 20 cm) y RTK CenterPoint (+2 cm), empleando simultáneamente las constelaciones GPS y Glonass. Vantage ha instalado el sistema en un John Deere 7720, cuyo propietario, Eduardo del Castillo, lo puso a nuestra disposición a instancias del concesionario Comercial JL Nombela.

Evaluación del error estático

Se denomina error estático a aquel que se produce cuando el vehículo está parado. En estas condiciones, cualquier variación de la posición en coordenadas refiere a errores del sistema de posicionamiento.

Para visualizar los errores estáticos se representan las variaciones de las coordenadas de posición (cm) espacial que registran las antenas. La **figura 1** muestra los errores de posicionamiento en estático del sistema DGPS (rojo) frente a los del sistema RTK (verde). Puede apreciarse cómo los puntos verdes (RTK) están todos muy próximos a cero, mientras que los puntos rojos (DGPS) se distribuyen de manera desigual en un rango de error siete veces mayor que el del RTK.

Para cuantificar el error estático se recurre a determinar el radio de la circunferencia que contiene un determinado porcentaje de los datos. En la **figura 2** se aprecia el error (cm) establecido como el radio de la circunferencia (cm) que contiene respectivamente el 90%, el 95% y el 100% de los puntos. En las especificaciones técnicas de estos equipos, estas medidas suelen denominarse CEP 90, R 95 y CEP 100, respectivamente.

El sistema RTK que hemos probado tiene en un 90% de los casos un error inferior a 1,1 cm frente a los 8,2 cm del DGPS. La mayor dispersión de los datos DGPS se manifiesta sobre todo en el radio de la circunferencia 100%: 13,3 cm frente a los 2 cm del sistema RTK. Del tipo de labor de-

FIGURA 1. Verificación del error en ensayo estático (vehículo parado).

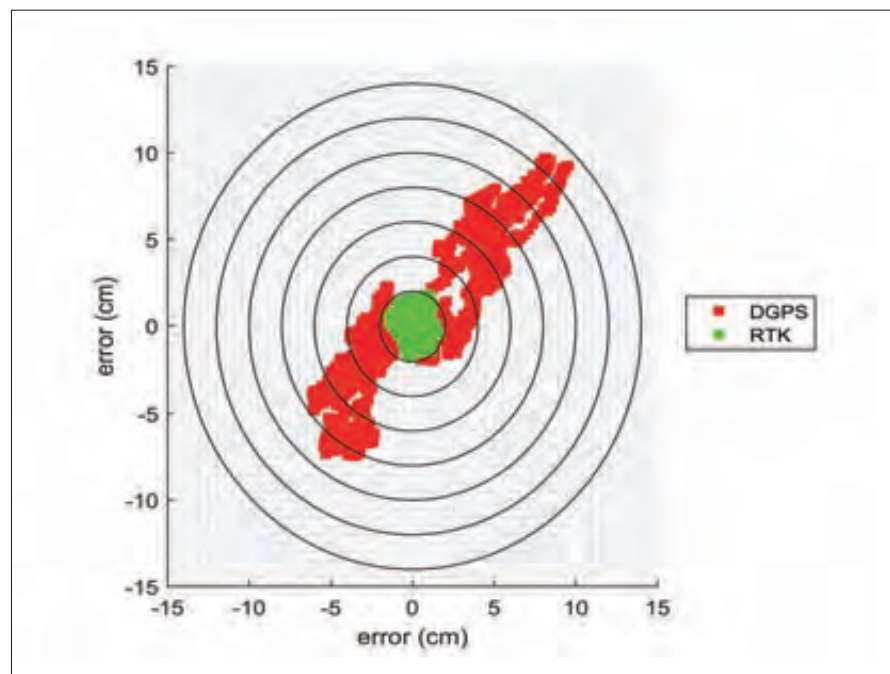
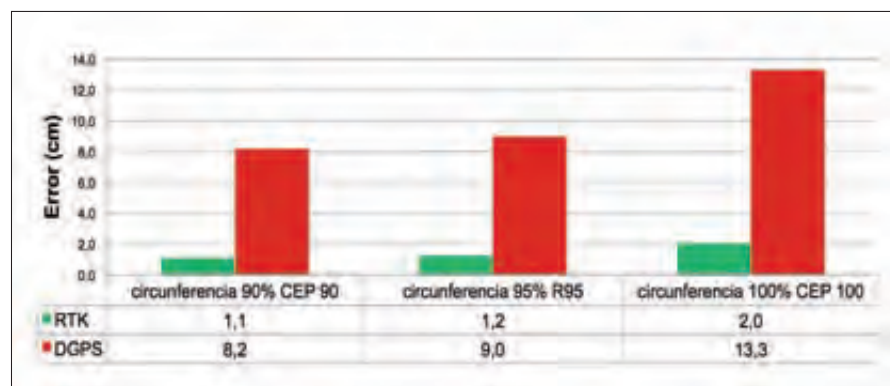


FIGURA 2. Caracterización del error estático (cm) a partir del radio de la circunferencia que contiene el 90%, 95% y 100% de los puntos registrados.



penden los distintos niveles de precisión requeridos.

Un aspecto que hemos detectado es la tendencia a establecer en las labores unos niveles de solapamiento muy superiores a los requeridos. Así, por ejemplo, es típico emplear en los sistemas DGPS un solapamiento de 30 cm, que en razón de estos resultados resulta excesivo y podría reducirse a 15-20 cm. De la misma manera, en el empleo de un sistema RTK el solapamiento no debe superar los 2 cm.

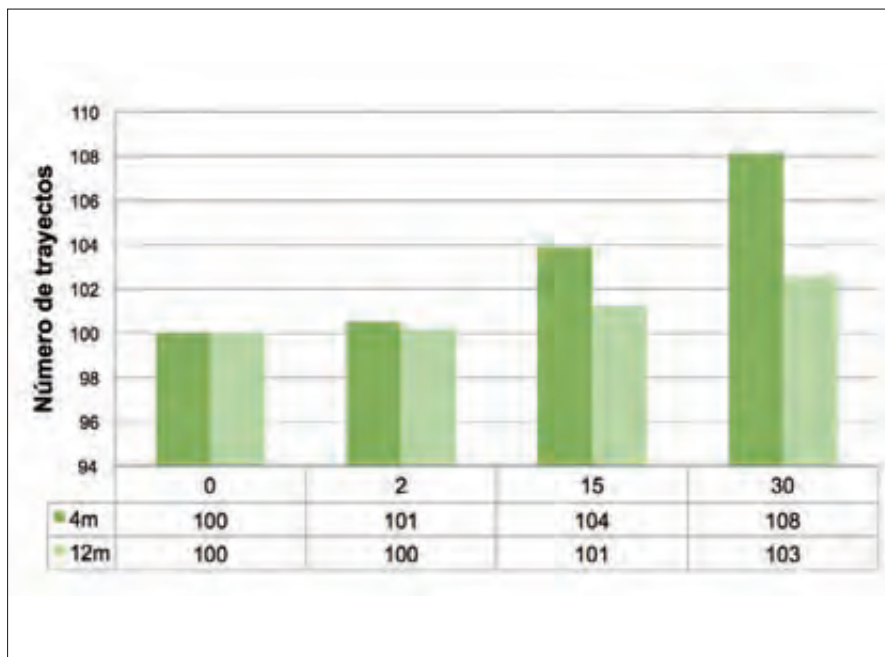
Cuanto menor es el ancho útil (m) de la máquina o apero, mayor es el impacto del solapamiento en términos de eficiencia en el trabajo. Así por cada 100 trayectos que realizamos con un solapamiento de 2 cm, efectuamos 108 con un solapamiento de 30 cm si el apero tiene 4 m de ancho útil, valor que se reduce a 103 trayectos con 12 m de distancia entre pasadas. En labores de aplicación de insumos, el mayor número de trayectos se traduce además en un mayor gasto del producto aplicado.

La **figura 3** muestra cómo disminuye el impacto del solapamiento cuanto mayor es el ancho útil de la máquina para solapamientos de 0, 2, 15 y 30 cm.

Procedimiento general en el ensayo dinámico

Para evaluar la calidad de un dispositivo es necesario disponer de un método que garantice un error diez veces menor que el del sistema en estudio. Cuando el error a evaluar es de ± 2 cm se hace imprescindible recurrir a un elevado número de trayectos de manera que el error de la determinación manual se vea minorado a niveles admisibles. Por ello, para la evaluación del autoguiado de Trimble hemos realizado en cada modalidad diez trayectos con un ancho entre pasadas de 2 m, sin solapamiento, determinando el ancho útil (m) en las zonas

FIGURA 3. Impacto del solapamiento en términos de número de trayectos considerando dos anchos útiles de trabajo (4 m y 12 m de anchura útil).



ES REAL: 4 AÑOS DE GARANTÍA

No podrás quitártelo de la cabeza...
New Holland te ofrece una **garantía de 4 años o hasta 4.000 horas en toda la gama de tractores T6, T7 y T8**, más confianza y tranquilidad.



*CONSULTE CONDICIONES EN CONCESIONARIOS OFICIALES NEW HOLLAND.

NEW HOLLAND TOP SERVICE 00800 64 111 111* ASISTENCIA E INFORMACIÓN 24/7.
*La llamada es gratuita desde teléfono fijo. Antes de llamar con su teléfono móvil, consulte tarifas con su operador



AMBERA lubricantes

FIGURA 4. Visualización de las pantallas del sistema de autoguiado.



Se instaló un cultivador con un solo brazo para determinar el ancho de trabajo con mayor fiabilidad.

centrales de las besanas (entre 25 y 75 m) con cinco repeticiones; de esta manera, el error sistemático de medida se reduce en un orden de magnitud permitiendo alcanzar los niveles de precisión deseados. Además se ha empleado un cultivador con un solo brazo centrado en el ancho de vía del tractor para facilitar el marcaje de las trayectorias; se ha empleado en todos los casos un régimen de motor de 1.900 rev min⁻¹ y la marcha F3 que en estas condiciones mantiene una velocidad de avance sobre el suelo de 7 km/h.

La **figura 4** muestra la visualización de las pantallas del sistema de autoguiado.

Las **figuras 5 y 6** superponen sobre la ortofoto del PNOA los trayectos realizados con el sistema DGPS y RTK, en recta y curva respectivamente; en este último caso, se indican con asterisco acciones específicas

del algoritmo de definición de trayectorias que se comentarán posteriormente.

La **figura 5** compara además la reproducibilidad de las trayectorias respecto a la recta de referencia tanto inmediatamente

como 4 horas después de su establecimiento, como medio de verificar la sensibilidad respecto a cambios en la configuración de los satélites accesibles. Hemos empleado para la determinación de



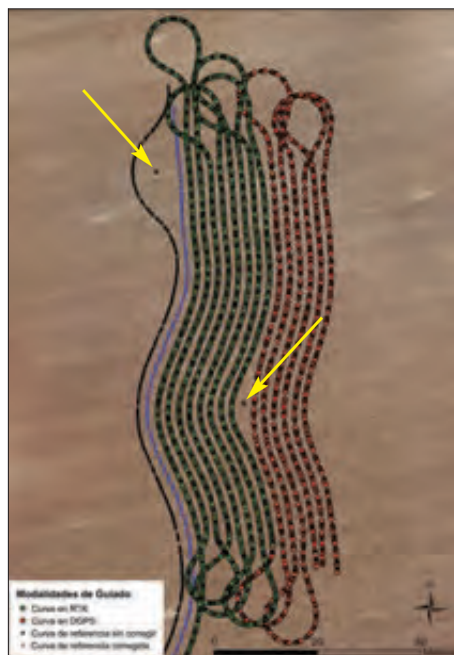
Vista del resultado del guiado en trayectorias rectas.

FIGURA 5. Superposición sobre la orto-foto del PNOA de los trayectos rectos realizados con el sistema DGPS y RTK.



FIGURA 6. Superposición sobre la orto-foto del PNOA de los trayectos curvos realizados con el sistema DGPS y RTK.

(Se indica con un asterisco los casos en que el software efectúa una corrección de la guía de referencia para reducir el radio de curvatura).



los anchos de trabajo un sistema de triangulación con dos cintas métricas de manera que se garantice la perpendicularidad en el punto de medida, tal y como se muestra en la **figura 7**. Este procedimiento se ha aplicado en trayectorias rectas y curvas entre 5 y 10 trayectos consecutivos.

La **figura 8** presenta el conjunto de las determinaciones manuales realizadas sobre los trayectos con RTK y DGPS tanto en trayectorias rectas como curvas, datos base empleados para efectuar comparativas tanto en términos de variabilidad de las medidas como del error absoluto (diferencia entre el valor de ancho programado y medido en campo).

Como análisis posterior se ha empleado la propia señal GNSS de Trimble registrada con una frecuen-



KRONE excellent
Plástico para encintado
... ¡que sostiene!

...excelente plástico para encintado de KRONE a la altura de sus promesas. Beneficiándose de unas prestaciones mecánicas extremadamente altas, ofrecen una gran resistencia a la punción y a la deformación como garantía de un óptimo ensilaje y un forraje perfecto – paca por paca!



farming
agrícola

Importador exclusivo para España y Portugal

Consulte nuestra red de distribuidores:
979 728 430 • www.farmingagricola.com



FIGURA 7. Procedimiento de triangulación empleado para determinar el ancho de trabajo a partir de la acumulación de trayectos consecutivos.

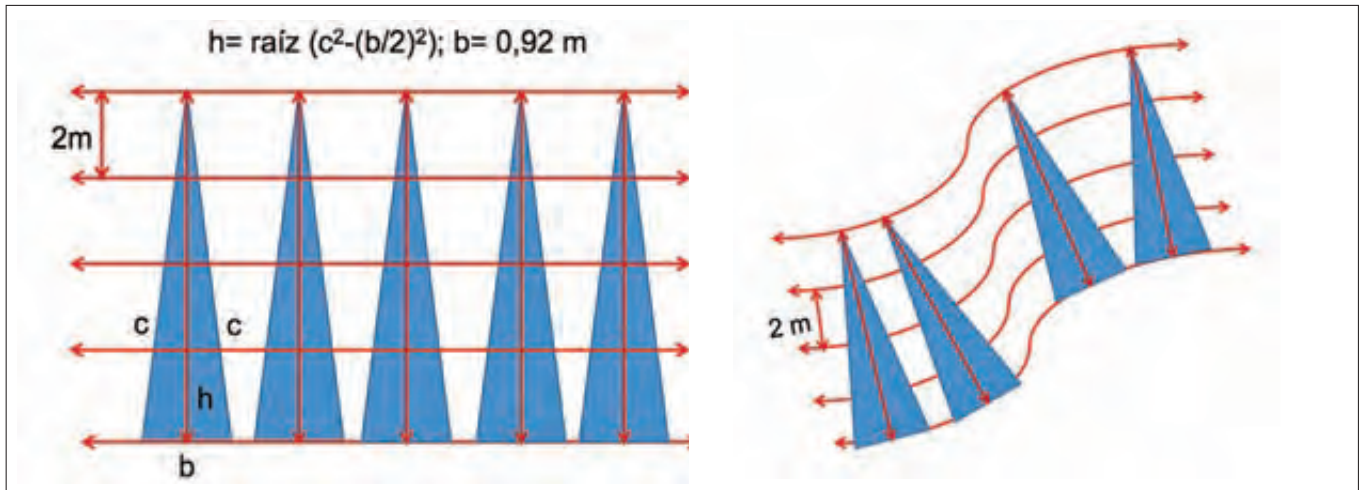
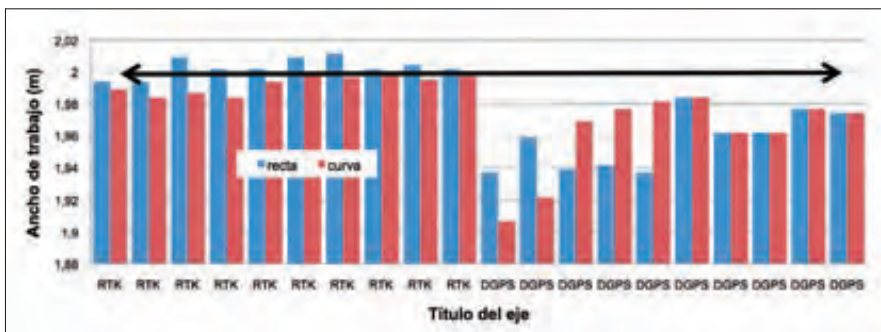


FIGURA 8. Determinaciones manuales del ancho de trabajo.



Detalle de la corrección de la línea de referencia en trayectorias curvas.

cia de 10Hz (10 datos por segundo) para visualizar todas las modalidades de ensayo, así como para determinar las características del sistema de gestión de cabeceras.

Evaluación de la calidad en el ancho de trabajo

Cuando se trabaja en trayectorias rectas la fuente principal de error proviene del sistema de posicionamiento, mientras que en trayectorias curvas contribuye al error tanto el sistema de posicionamiento como la reactividad del sistema de control (volante accionado con motor paso a paso).

La **figura 9** compara el ratio de variabilidad entre el sistema DGPS y el RTK en trayectorias rectas, apreciándose que la variabilidad en las líneas del sistema DGPS es cinco veces la observada con el sistema RTK. Además en esta misma figura se verifica que la variabilidad en trayectorias curvas es 1,5 veces superior a la observada en trayectorias rectas tanto con el sistema DGPS como con el sistema RTK.

La **figura 10** compara el error absoluto (cm) registrado con el sistema RTK y DGPS. Se observa que con el sistema RTK la diferencia entre el ancho programado y

FIGURA 9. Comparación del ratio de variabilidad en el ancho de trabajo en modo DGPS respecto a RTK en trayectorias rectas, y en trayectorias curvas respecto a rectas.

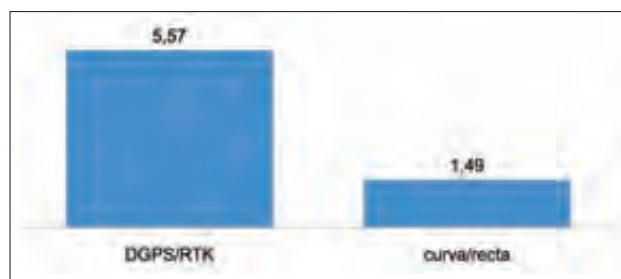
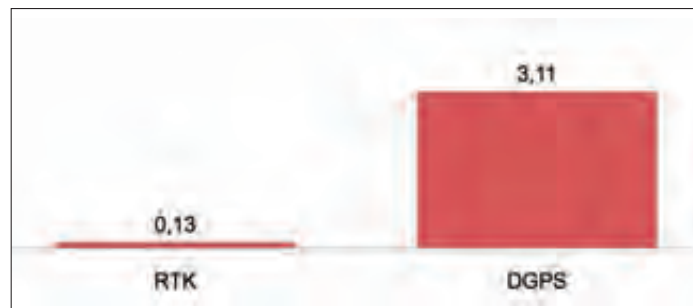


FIGURA 10. Error absoluto promedio (cm) registrado para un ancho de trabajo de 2 m.



determinado manualmente es de 0,13 cm, mientras con el sistema DGPS se cuantificó en 3,11 cm. Cabe destacar que ambos valores son muy reducidos.

Una particularidad del algoritmo que emplea el sistema de guiado Trimble es que al reproducir trayectorias curvas, cuando estas se cierran en exceso, el autoguiado restablece la trayectoria de referencia. Este hecho da lugar a irregularidades como las que se aprecian en la **figura 6** y que están indicadas con asterisco (*). En estos casos puede quedar una pequeña zona sin trabajar. Este aspecto no se produce en trayectorias circulares propias de los pivots.

Programación de cabeceras

Una capacidad adicional del sistema de guiado Trimble es la reproducción automática de cabeceras. En este caso el operador presiona la confirmación en cualquier instante dentro de los últimos 30 m de la línea, y el tractor realiza la operación de viraje de manera completamente autónoma. Existen distintas opciones de configuración de las cabeceras: simétrica o asimétrica (derecha o izquierda) y suave o cerrada.

En este ensayo hemos comparado los distintos tipos de cabeceras tanto en modo manual como automático, realizando ocho repeticiones de cada una de ellas (cuatro en cada cabecera).

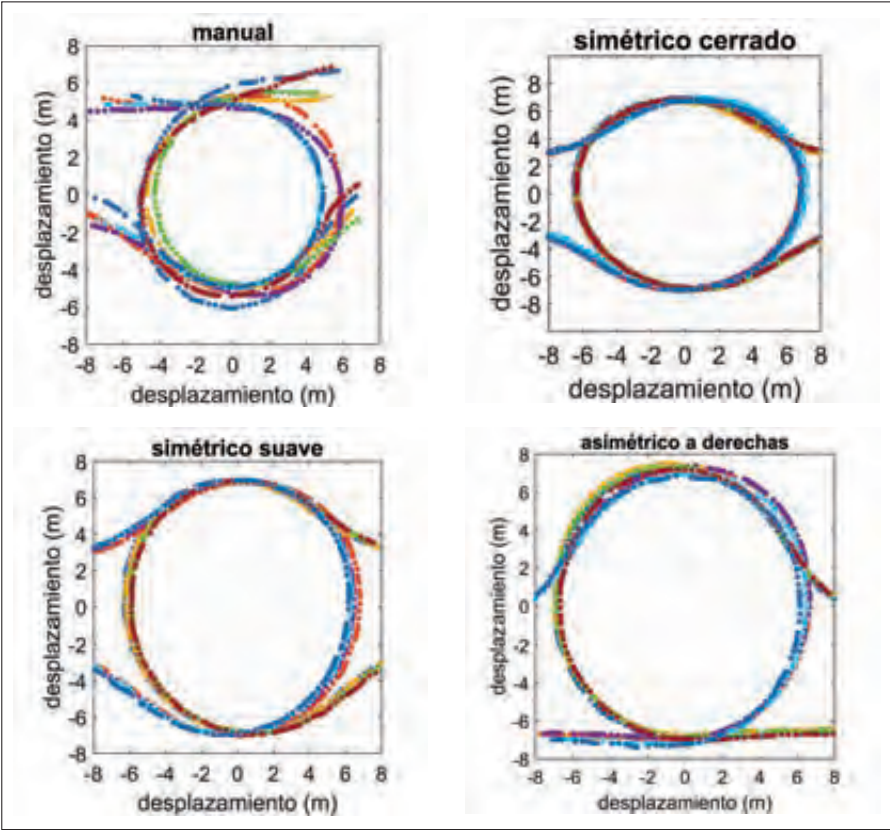
La **figura 11** superpone las ocho cabeceras respecto a su centro. Se puede observar que en los giros automáticos las

ocho repeticiones prácticamente se superponen unas con otras, mientras que los giros manuales son más variables (trayec-



Detalle del sistema de triangulación empleado para la determinación del ancho de trabajo en diez líneas consecutivas.

FIGURA 11. Cabeceras superpuestas para mostrar las posibilidades del modo automático respecto al manual; 8 repeticiones en cada modalidad.



torias menos superpuestas) que los automáticos.

El **cuadro IV** resume algunos parámetros característicos de los virajes: diámetro equivalente de giro (m), velocidad media (km/h) y sus respectivas variabilidades en %; el diámetro equivalente se calcula a partir del área de viraje definiendo el diámetro del círculo equivalente. En todos los virajes

automáticos el diámetro equivalente medio se sitúa en 14,5 m, frente a los 11,2 m en manual; la cabecera automática que más se parece a la manual es la simétrica cerrada. Por otra parte, la variabilidad de los giros manuales ese sitúa en un 6% frente al 1,5% de los virajes automáticos.

Cuando el viraje es asimétrico la entrada en línea es más recta, lo que puede suponer una ventaja a la hora de converger desde el inicio a la trayectoria deseada, sin perjudicar el radio de giro. En todos los casos la velocidad media fue muy constante (variabilidad en torno a 0,5%) con un valor promedio de 7 km/h.

CUADRO IV

Caracterización del diámetro de giro (m), velocidad (km/h) y sus variabilidades respectivas en giros en cabecera manual y automático.

	Asimétrico derechas	Simétrico suave	Simétrico cerrado	Manual
Diámetro (m)	14,8	14,2	14,4	11,2
Variabilidad (%)	1,2	1,5	1,5	5,8
Velocidad (km/h)	7	7	7,1	6,9
Variabilidad (%)	0,3	0,3	0,3	0,7

A modo de conclusión

En este ensayo hemos comprobado que los niveles de precisión RTK (± 2 cm) decla-

rados por Trimble, son perfectamente reproducibles tanto en ensayos estáticos como dinámicos, tanto en trayectorias rectas como curvas.

En el modo DGPS la precisión observada ha sido mayor de la esperada: $\pm 13,3$ cm, frente a los ± 20 cm esperables en la señal Egnos, aunque esto no se puede extrapolar a cualquier condición.

La variabilidad de los anchos de trabajo en el modo DGPS se ha observado que es 5,6 veces superior en el modo DGPS que en el modo RTK, y 1,5 veces superior en trayectos curvos que rectos. La reproducibilidad de los ensayos se ha mantenido incluso reproduciendo las líneas de referencia 4 h después de su definición.

El software de delineación de trayectorias curvas corrige en ciertas ocasiones la línea de referencia pudiendo dar lugar a pequeñas zonas sin trabajar, debido a la dificultad de reproducir curvas muy cerradas, por lo que es recomendable realizar curvas suaves. Este efecto no se reproduce en los trayectos tipo pivót en el que el radio de giro es constante.

En general los usuarios tienden a emplear solapamientos excesivos para la calidad del autoguiado, que especialmente en el modo DGPS puede dar lugar a un incremento significativo de trayectorias a lo largo de las jornadas de trabajo con la consiguiente pérdida de capacidad de trabajo.

La capacidad de realizar virajes totalmente autónomos es una posibilidad del sistema Trimble cuya reproducibilidad se ha verificado elevadísima (variabilidad inferior a 0,5%), y muy superior al modo manual (5,8%), aunque este último tiende a realizar virajes de diámetro menor.

Parece claro que la disponibilidad de sistemas completamente autónomos es más un problema de legislación que técnico. Mientras tanto, el sistema de autoguiado Trimble mejora la precisión del trabajo, y disminuye sensiblemente la fatiga del operador ampliando el tiempo de trabajo disponible en cada jornada incluso en condiciones de baja luminosidad. ■