

CONTROL INTELIGENTE DE EQUIPOS PARA EL MANEJO DE MALAS HIERBAS

Manuel Pérez-Ruiz

*Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos. Área
de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Sevilla.*

Correo electrónico: manuelperez@us.es

Juan Agüera Vega

Dpto. de Ingeniería Rural. Universidad de Córdoba.

Correo electrónico: jaguera@uco.es

1. Introducción



En la última década se ha hablado mucho de la conveniencia de introducir la **automatización y robótica en el campo** al igual que ya se ha hecho en otros sectores productivos, lo que está permitiendo ver en la agricultura el siguiente paso de la automatización industrial. Sin embargo, a pesar del esfuerzo realizado para penetrar en el mercado de la agricultura y de las muchas ventajas potenciales que presenta la robótica móvil, seguimos sin ver robots integrados de modo real en las tareas agrícolas. Son varias las razones y sobre todo dos de ellas las que mejor explican las diferencias entre un escenario industrial y uno agrícola (Ribeiro et al., 2011):

1) El entorno de actuación de un robot agrícola no puede estar totalmente estructurado, es decir, en el mejor de los casos el robot puede disponer a priori de una información limitada y parcial del cultivo, por lo que necesita algún medio (sensores) para disponer de información más precisa y actualizada durante la ejecución de la tarea. Además necesita tomar decisiones adecuadas, a pesar de la información incompleta e imprecisa que maneja sobre su entorno, a la hora de realizar sus funciones.

2) Para un uso agrícola, el robot no puede estar fijo, ubicado en una posición perfectamente conocida y accediendo de forma muy precisa y segura a los puntos de un volumen establecido con gran exactitud (como es el caso de los manipuladores en una cadena

de producción). En el campo el producto sobre el que se actúa (mala hierba/cultivo/suelo) es el que está fijo y por tanto es el robot el que tiene que moverse de modo seguro, con el agravante de que el entorno es semi-conocido y rápidamente cambiante.

A pesar de todo ello el empresario agrícola, popularmente "el agricultor", tiene por delante el importante reto de conseguir una explotación rentable y eficiente, según lo que se viene denominando **Agricultura de Precisión (AP) o Agricultura Inteligente (AI)**. El sector agroforestal puede ser uno de los más beneficiados, el progreso a través de la investigación y tecnificación, pondrá en sus manos en los próximos años a nivel comercial robots y nuevos aperos inteligentes (Figura 1). Estos nuevos equipos tendrán la tarea de optimizar algunos de los procesos más críticos en la obtención de resultados, facilitar las tareas más tediosas y también reducir la mano de obra del mismo y de los procesos industriales asociados al sector. El tratamiento localizado o individualizado de cada zona de una parcela o de cada planta, es el futuro que le espera a la agricultura para su competitividad a nivel global (Slaughter & Pérez-Ruiz, 2014).

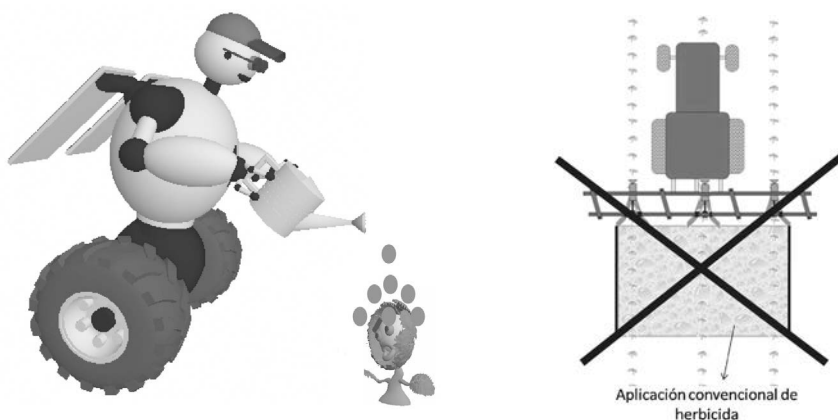


Figura 1. a) Ilustración conceptual de robot aplicando herbicida de forma individual (www.robots4farms.com) y b) aplicación a todo terreno de herbicida

Entre los empresarios agrícolas, en los dos últimos años se han popularizado los productos relacionados con la ayuda al guiado y guiado automático en tractores y maquinaria autopropulsada, comercializándose con bastante éxito en el sector. El sistema de guiado automático consta de dos partes: un procesador que recibe la información de los sensores (GNSS, giróscopos, acelerómetros, etc.), realiza los cálculos y establece las correcciones, y un monitor donde se visualiza la información y se introducen los parámetros de configuración y demás datos particulares de la operación a realizar, utilizando la propia pantalla que suele ser de tipo táctil (Pérez-Ruiz et al., 2011). Para conseguir altas precisiones, con errores por debajo de los 2,5 cm, un receptor RTK-GNSS debe proporcionar las coordenadas del punto en el que se encuentra el vehículo, esto es posible gracias a las señales de corrección de una estación fija RTK propia o procedentes de una red RTK (Redes públicas disponibles con señal RTK en Andalucía, Castilla León, Extremadura, Madrid, Murcia, Valencia, etc.).

El siguiente paso en materia de automatización de vehículos agrícolas es conseguir que sean **completamente autónomos** (Emmi et al., 2013). Un sistema como este permite aumentar la productividad de la operación agrícola, de manera que una sola persona pueda supervisar tres o más tractores que trabajan en una misma parcela. Con un desarrollo como éste se reduce al mínimo la interacción, automatizando todas las funciones rutinarias del vehículo agrícola y dejando al operador humano tareas de mayor nivel como la supervisión del funcionamiento, verificación de obstáculos, validación del trabajo, etc. El operador, situado en una cabina/oficina a pie de campo, recibe información de los tractores a través del sistema de telemetría, el cual permite visualizar en una aplicación informática la localización actualizada de cada uno de los vehículos que están trabajando en la explotación agrícola (Drenjanac et al., 2013).

El **Proyecto Europeo RHEA (Robot Fleets Highly Effective Agriculture and Forestry Management)**, finalizado en julio de 2014, con una duración de 4 años, y liderado por España, ha supuesto un gran éxito a nivel internacional. En él han colaborado investigadores y empresas tecnológicas de diseño y fabricación de maquinaria y equipamiento agrícola procedentes de 8 países. En el ámbito del proyecto RHEA se ha desarrollado una flota de tractores completamente autónomos para la realización de tareas específicas en tres ámbitos de actuación: cultivos de cereal, maíz y olivar (Gonzalez-de-Santos, 2013). Para cada uno de los ámbitos

ha sido diseñado, construido y evaluado un apero inteligente, que permite realizar sin intervención humana labores muy precisas.

Este proyecto esta siendo toda una inspiración y empuje para el sector agrícola en cuanto a la automatización de tractores y **maquinaria dedicada al control de la mala hierba**. La flota está formada por tres tractores autónomos que disponen de los sensores e instrumentación que junto con un sistema de navegación RTK-GNSS (Global Navigation Satellite System-TRIMBLE) permite la ejecución de las trayectorias diseñadas para la realización de la operación agrícola de forma optima y sin intervención de operario. Además, dispone de un sistema de visión artificial utilizado también para el guiado y **detección de mala hierba en tiempo real** sobre el cultivo de maíz (Guijarro et al., 2013).

Un equipo inteligente capaz de realizar un buen control de la mala hierba está compuesto fundamentalmente por dos subsistemas: detección de mala hierba o cultivo y ejecución del control.

2. Detección de la Mala Hierba

En la agricultura actual, el uso de herbicidas químicos es todavía el método preferido para el control de la mala hierba, y en algunos casos, el único método viable. Sin embargo, comienzan a emerger alternativas técnica y económicamente viables para una aplicación selectiva con precisión centimétrica.

La mayor parte de la maquinaria agrícola utilizada actualmente sólo permite que los herbicidas sean aplicados con una dosis uniforme, sin tener en cuenta la variabilidad espacial de la densidad con la que usualmente se presenta la mala hierba. En algunas áreas donde no existe o existe en poca cantidad se aplica la misma cantidad de herbicida que en aquellas otras donde la densidad de mala hierba es mayor. Actualmente, se esta trabajando fundamentalmente en dos metodologías para conocer la localización de la mala hierba en el campo: a) detección en tiempo-real basada en sensores (Gerhards and Christensen, 2003) y b) la generación de mapas de infestación (Peña et al., 2013). Ambos métodos se encuentran en la filosofía de la AP o AI, pero se diferencian de forma sustancial.

a) Sistemas de detección en tiempo-real sobre equipos terrestres; al implemento o vehículo se le dota de los componentes ópticos y electrónicos necesarios para la detección sobre la

marcha de la presencia de mala hierba (ej. visión artificial), la información que generan es usada como indicador para regular la distribución del herbicida utilizado en la aplicación o controlar otro tipo de sistema alternativo a la aplicación de herbicida. Estos equipos son montados en la barra de tratamientos y tienen como componentes básicos: 1) un controlador que permite el ajuste y calibración del sistema, 2) un sensor de hasta 30-38 cm de ancho de detección para una altura de trabajo de entre 46 -76 cm, 3) boquilla de aplicación y 4) accesorios adicionales (radar, válvula solenoide, conectores, etc.). Puede ser usado para activar su propia boquilla integrada en la unidad, o por el contrario puede usarse para controlar una o más boquillas externas a cierta distancia del sensor.

El fabricante de uno de estos tipos de sensores ha llevado a cabo ensayos en una parcela estandar de 100 ha, donde se hizo una división en 4 sub-parcelas experimentales con un diferente nivel de infestación cada una de ellas, 80%, 60%, 40% y 10%. La aplicación se realizó con un equipo convencional de pulverización + WEEDSEEKER (Figura 2) y se usó un herbicida total y sistémico al 1,5% (Glifosato). Los ahorros proporcionados en la reducción del uso del producto herbicida son; 260 € para la sub-parcela de infestación 80%, 500 € para la parcela con infestación del 60%, 625 € para la sub-parcela de infestación 40% y 800 € para la sub-parcela con infestación del 10%.

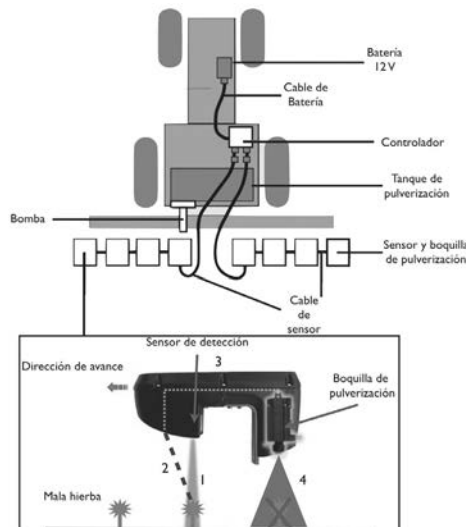


Figura 2. Sistema automático de control de mala hierba. WeedSeeker (TRIMBLE Navigation L.)

b) Generación de mapas con zonas específicas de infestación; se está trabajando intensamente a nivel de investigación para que unidades aéreas no tripuladas sean capaces de detectar al menos el 90% de los rodales de malas hierbas presentes en las parcelas (Figura 3a y 3b). Estas unidades aéreas con las cámaras o sensores ópticos adecuados pueden generar una información muy útil, pero además se debe procesar de forma muy rápida para evitar que transcurra mucho tiempo entre el análisis del mapa y la aplicación, ya que puede suceder que la dosis pre-fijada no corresponda exactamente con la que se necesita en el momento de la aplicación.

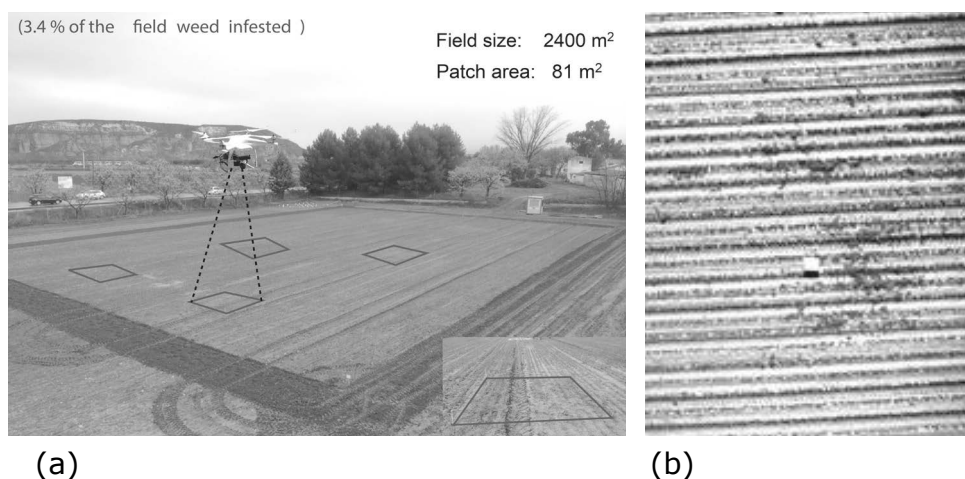


Figura 3. a) Operativa para la detección de los rodales de mala hierba con UAVs y b) generación de mapas de aplicación localizada de herbicida.

3. Detección del Cultivo

Algunos grupos de investigación están trabajando en sistemas que permitan obtener con una alta precisión las coordenadas (X,Y) de la semilla durante la operación de siembra (ej. algodón) (Ehsani et al., 2004) o de la planta en el momento de colocarla en el suelo mediante transplante (ej. tomate) (Sun et al., 2010). Para ello se requiere el montaje sobre la sembradora o transplantadora de un equipo RTK-GNSS de manera que cada vez que una semilla cae por la bota de siembra y es colocada en el suelo, quedan registradas sus coordenadas (X,Y). Esto permite tener,

al finalizar la operación de siembra o transplante, la información necesaria para construir un mapa de la parcela con las semillas o plantas geo-referenciadas. El hecho de conseguir este mapa de plantas de cultivos geo-referenciadas con alta precisión, permite posteriormente eliminar toda la vegetación que no se encuentra en esas coordenadas, bien de forma mecánica o con la aplicación de herbicida localizado (Figura 4).

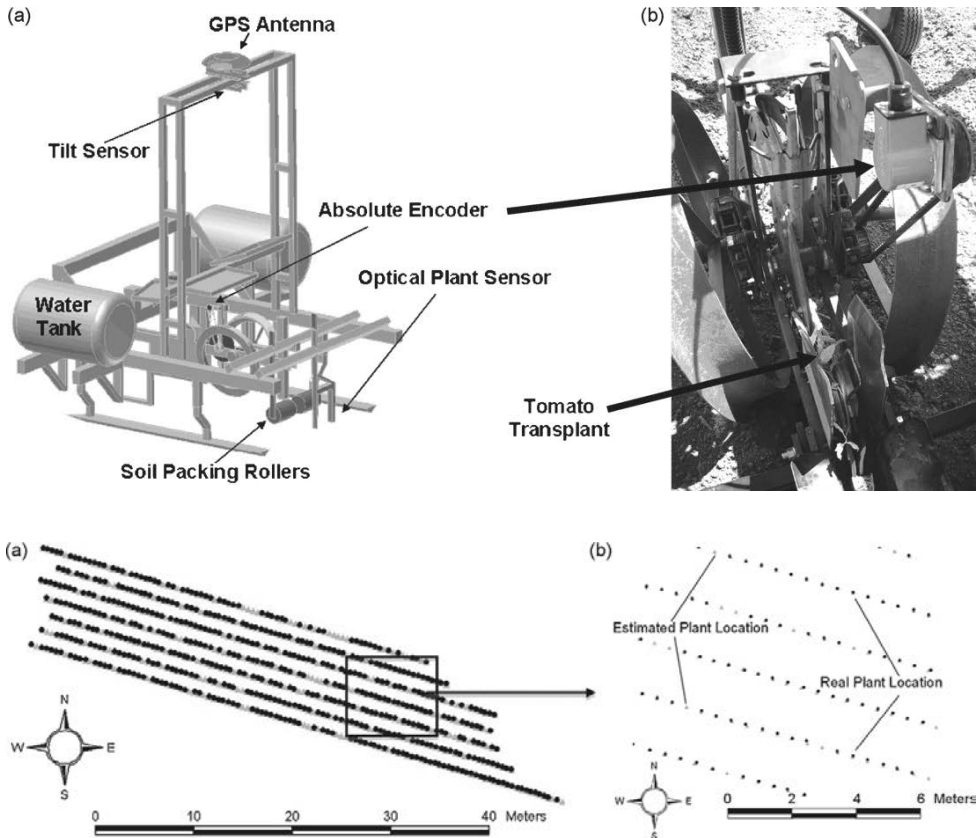


Figura 4. Sistema de geo-referenciación de plantas de tomate y mapa generado.

4. Sistemas de Actuación Inteligente para el control Químico de Malas Hierbas.

En el marco del proyecto de investigación RHEA, la empresa de base tecnológica AGROSAP ha diseñado y construido un equipo

de aplicación de herbicida inteligente con sensores e instrumentación, que permite: 1) control automático de tramos y/o boquillas, 2) la inyección directa, y 3) la aplicación variable de herbicida (Figura 5). Con este equipo el tratamiento químico se puede realizar a partir de un mapa de infestación de malas hierbas construido con las imágenes e información tomada por unidades aéreas (ej. UAVs). Resultados preliminares con este equipo han mostrado ahorros de hasta el 60-70% en productos herbicidas (Pérez-Ruiz et al., 2014).



Figura 5. Equipo autónomo para la aplicación localizada de herbicida (Proyecto RHEA-www.rhea-project.eu).

5. Sistemas de Actuación Inteligente para el control Mecánico de Malas Hierbas.

El control de la mala hierba de forma automatizada, y sin uso de herbicidas, es uno de los mayores retos que se presentan en los países industrializados. Este apartado hace referencia a los sistemas automáticos y mecánicos de eliminación de la mala hierba en la propia línea de cultivo. Nos centraremos en dos de los sistemas más prometedores, en opinión de los autores, para el control mecánico de la mala hierba en línea de cultivo: disco rotativo controlado por un sistema de visión (Robocrop) (Tillett et al., 2007) y rejas neumáticas controladas por mapa de cultivo (Perez-Ruiz et al., 2012).

a) Disco rotativo controlado por sistema de visión. El uso de equipos inteligentes es necesario para conseguir un buen control selectivo de la mala hierba y el menor daño posible para el cultivo. De los primeros equipos que aparecieron de forma comercial podemos destacar el construido por la compañía francesa SarlRadis (www.radismecanisation.com) y la inglesa Garford (www.garford.com). Ambos equipos son muy similares y disponen de un sistema de detección de la planta basado en la intercepción de la luz reflejada, y una reja que va rotando enterrada unos centímetros, de planta de cultivo a planta de cultivo, evitando éstas y eliminando la posible mala hierba existente entre ellas. Este equipo fue construido pensando en lechuga transplantada, aunque su eficacia está condicionada por el porte de la mala hierba (Figura 6).

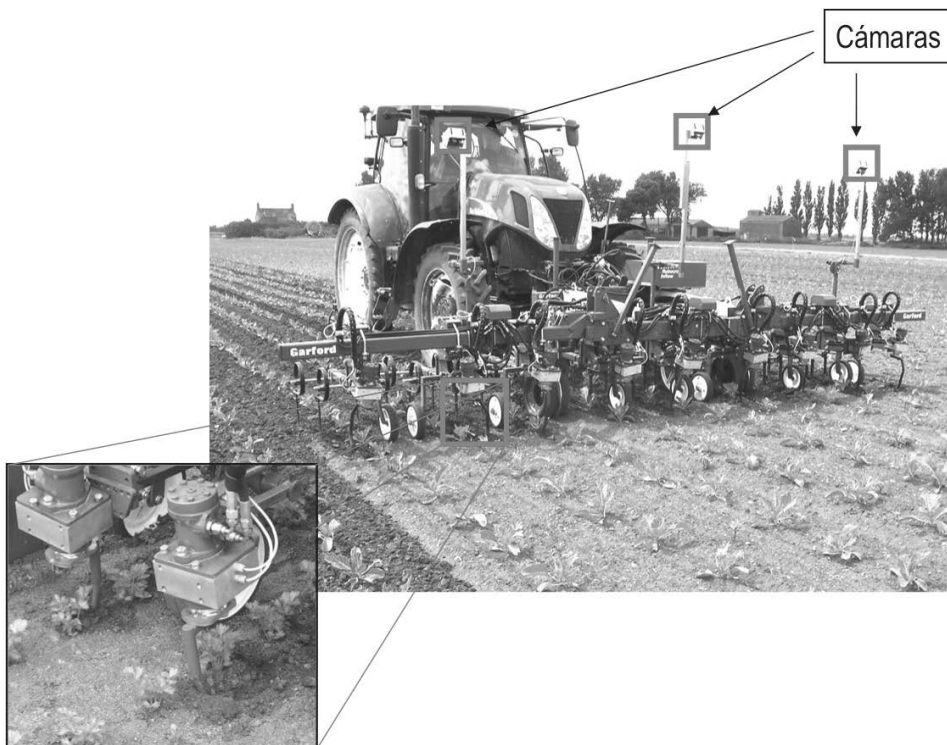


Figura 6. Equipo RobocropInRow de la compañía Garford (www.garford.com)

b) Rejas neumáticas controladas por mapa de cultivo. Este sistema requiere que durante la operación de plantación del cultivo, cada una de las plantas sean geo-referenciadas (X,Y) con

un sistema de posicionamiento global en tiempo real (GNSS-RTK) instalado en la plantadora como se describió anteriormente, lo que permite obtener los mapas de plantas de cultivo geo-referenciadas con precisión centimétrica (± 2 cm).

El equipo diseñado consta de un par de rejas móviles con accionamiento neumático. El sistema neumático permite abrir y cerrar las rejas evitando la planta de cultivo al pasar junto a ella. Las rejas están situadas en el centro de la línea del cultivo y se aproximan a la planta de cultivo en su configuración de trabajo "cerradas", en las proximidades a la planta cambia su configuración y se "abren" (Figura 7). La apertura y cierre de las rejas es activada, a través de unos cilindros neumáticos, por la información procedente del mapa de cultivo generado. La profundidad de la labor que las rejas realizan es de 3-4 cm durante el espaciado entre plantas de cultivo y dejando una zona de seguridad (Zona C, en la figura 7a), para no provocar daño a la raíz, muy próxima a la planta.

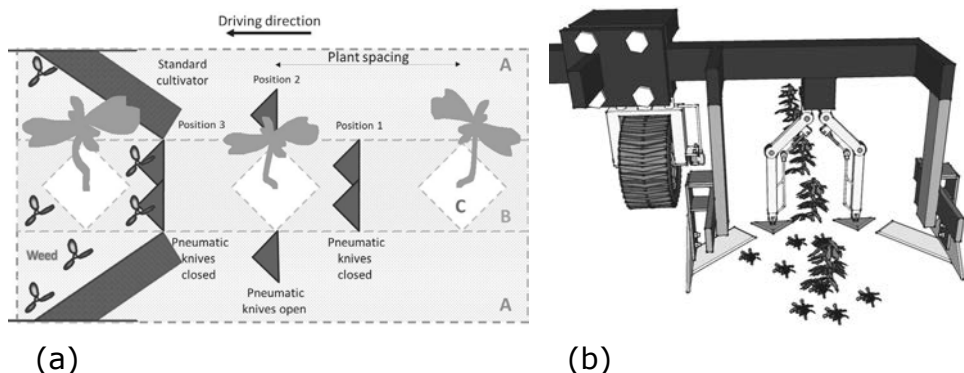


Figura 7. a) Ilustración de las tres zonas de control: A= entre líneas, B= línea de cultivo, y C= zona de seguridad. Posición 1 y 3 muestran la rejas cerradas realizando la operación de control. Posición 2 muestra la rejas abiertas evitando la planta de cultivo. b) equipo automático para el control de la mala hierba.

Los ensayos se han realizado sobre cultivo de tomate en extensivo para industria, previamente trasplantado con un separación entre plantas de 34 cm donde se empleó una trasplantadora equipada con un sistema GNSS-RTK. Se han ensayado dos velocidades de trabajo del equipo: 0,8 km/h y 1,6 km/h. Los resultados obtenidos demostraron que el sistema automático de control de mala hierba basado en GNSS centimétrico se encontró centrado en la línea de cultivo con un error medio de 0,8 cm con unas desviaciones típicas de 1,75 cm y 3,38 cm cuando la velocidad de avan-

ce fue 0,8 km/h y 1,6 km/h, respectivamente. El tamaño medio de la zona C, zona de seguridad, fue de 15,70 cm en la velocidad de trabajo de 1,6 km/h y 5,15 cm para la velocidad de 0,8 km/h. Estos valores son muy satisfactorios ya que las distancias fijadas por el operador fueron de 15,24 cm y 7,62 cm, respectivamente para las dos velocidades. Los resultados muestran la viabilidad del uso de equipos GNSS-RTK para controlar de manera automática la trayectoria y actuación de los elementos mecánicos para controlar la mala hierba entre planta y planta de cultivo en sistemas agrícolas más sostenibles.

6. Conclusiones

Todos somos conscientes que la Agricultura de Precisión o Agricultura Inteligente ha llegado para quedarse. Al igual que ocurrió en su momento con la introducción de otras "nuevas tecnologías" que en la actualidad consideramos establecidas (uso fertilizantes químicos, tractor, cosechadoras ...), nuestra generación se encuentra con el reto de tecnología digital, que ya ha supuesto un cambio de paradigma tanto en el sector productivo como en el de la relaciones sociales. Por otro lado, el aumento de la población mundial y el creciente interés del consumidor por la seguridad alimentaria y el medio ambiente, hace que no podamos ignorar los nuevos avances si queremos ser competitivos en una economía cada vez mas globalizada.

Cada día contaremos con más resolución en cámaras para detección, UAVs, algoritmos que ayuden a la toma de decisiones a los técnicos, micro-contralores, sensores, etc. Por poner alguna magnitud a estos comentarios, podemos decir que en el ultimo año las compañías de drones han vendidos unas 500.000 unidades a nivel mundial (ej. Parrot, DJI), y en España hasta Octubre de 2014 se han vendido unas 1000 unidades de guiados automáticos para vehículos agrícola (ej. TRIMBLE, CNH).

Son muchos los grupos de trabajo implicados en desarrollos y proyectos que plantean el control inteligente de la mala hierba y todos ellos muy ambiciosos. Por ejemplo, se espera que a corto plazo las unidades aéreas sean capaces de detectar al menos el 90% de los rodales de malas hierbas presentes en las parcelas y que los sistemas de detección de los equipos terrestres tengan una capacidad igual o mayor (ej. visión artificial). Igualmente se prevé que los sistemas de actuación (química o física) permitan destruir un 90 % de las malas hierbas detectadas, así como

reducir un 75% el uso de herbicidas químicos, con otros beneficios adicionales tales como una menor compactación del terreno o el minimizar el contacto de los trabajadores agrarios con los productos químicos. Habrá que esperar algún tiempo para ver si estos objetivos se han alcanzado total o parcialmente. En cualquier caso, estas investigaciones habrán supuesto un considerable avance en la automatización de tareas agrícolas a nivel de Europa, y particularmente de España.

7. Agradecimientos

Este artículo ha sido posible gracias a la financiación del proyecto Europeo RHEA (245986), el proyecto Nacional "AGL2013-46343-R" y el proyecto Autonómico de Excelencia "P12-AGR-1227". Los autores desean expresar su reconocimiento a todos los participantes de los proyectos mencionados y al "PrecisionAgricultureLaboratory" de la Universidad de Sevilla (<http://grupo.us.es/pal/>).

8. Bibliografía

- Drenjanac, D., Klauser, L., Kühn, E. & Tomic, S. 2013. Semantic shared spaces for task allocation in a robotic fleet for precision agriculture. *Metadata and Semantics Research. Communication in Computer and Information Science* Vol. 390, pp. 440-446.
- Ehsani, M.R., Upadhyaya, S.K. & Mattson, M.L. 2004. Seed location mapping using RTK-GPS. *Transactions of the ASABE*, Vol. 47 (3): 909-914.
- Emmi L., Paredes-Madrid, L., Ribero, A., Pajares, G. & Gonzalez-de-Santos, P. 2013. Fleets of robots for precision agriculture: A simulation environment. *Industrial Robot: An international Journal*, Vol. 40 Iss:1, pp.41-58.
- Gerhards, R. & Christensen, S. 2003. Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugarbeet, Winter wheat and Winter barley. *WeedResearch*, Vol. 43, Iss.6, pp. 385-392.
- Guijarro, M., Guerrero, J.M., Montalvo, M., Romero, J. & Pajares, G. 2013. A new approach to sole image thresholding in precision agriculture. *Proc. 9th European Conf. on Precision Agriculture (ECPA 2013)*, pp.1-2 July 7-11, Lleida, Spain.

- Gonzalez-de-Santos, P. 2013. RHEA-2012: Robotics and Associated High-Technologies and Equipment for Agriculture. *Industrial Robot: An International Journal*, 40(1).
- Peña, J.M., Torres-Sánchez, J., De Castro, A.I., Kelly, M. & López-Granado, F. 2013. Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images. *PlosOne* 11, DOI: 10.1371/journal.pone.0077151
- Pérez-Ruiz, M., Carballido, J., Agüera, J. & Gil, J.A. 2011. Assessing GNSS correction signals for assisted guidance systems in agricultural vehicles. *Precision Agriculture*, Vol. 12, pp. 639-652.
- Pérez-Ruiz, M., Slaughter, D.C., Gliever, C.J. & Upadhyaya, S.K. 2012. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 80, pp.41-49
- Pérez-Ruiz, M., Gonzalez-de-Santos, P., Ribero, A., Fernandez-Quintanilla, C., Peruzzi, A., Vieri, M., Tomic, S. & Agüera, J. 2014. Highlights and preliminary results for autonomous crop protection. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 110, pp.v 150-161
- Ribeiro, A. & Conesa-Muñoz, J. 2011. Path-planning of a Robot Fleet Working in Arable Crops: First Experiments and Results. Conferencia: Robotic and Associated High-Technologies and Equipment for Agriculture. Montpellier, Francia.
- Slaughter, D.C. & Pérez-Ruiz, M. 2014. Advances in automatic individual plant care of vegetable crops. 12th International Conference on Precision Agriculture. July 20-23, Sacramento, CA (USA)
- Sun, H., Slaughter, D.C., Pérez-Ruiz, M., Gliever, C., Upadhyaya, S.K. & Smith, R.F. 2010. RTK GPS mapping of transplanted row crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 71(1), pp.32-37
- Tillett, N.D., Hague, T., Grundy, A.C., Dedousis, A.P. 2007. Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. *Biosystems Engineering*, Vol. 99, pp. 171-178