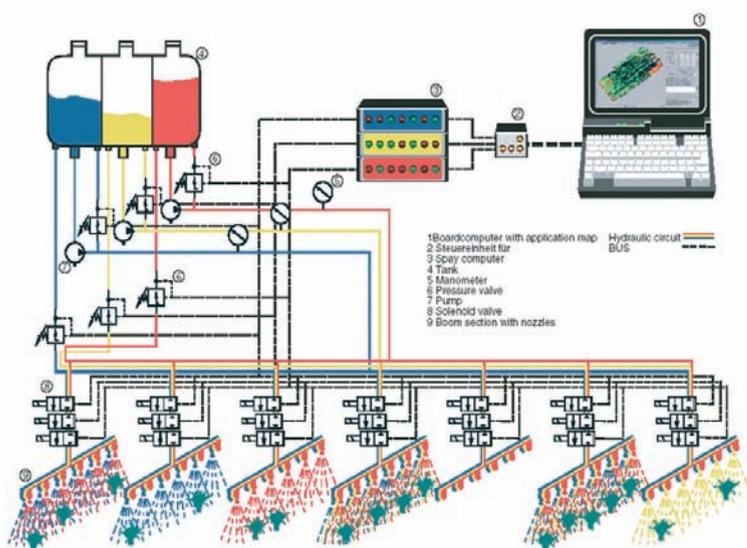


Un autómata para el control de malas hierbas en cultivos extensivos (maíz): SAAPIN

En el Proyecto SAAPIN (Sistema Autónomo para Agricultura de Precisión e Integrada) se trabaja para obtener un vehículo agrícola capaz de desplazarse de forma autónoma por un campo de maíz, distinguir las plantas de cultivo (maíz) de las malas hierbas cercanas y proceder a su escarda mecánica de forma selectiva. Se está trabajando en estos tres objetivos de forma conjunta. Actualmente se ha procedido al acoplamiento de los sensores necesarios para el desplazamiento autónomo del vehículo y próximamente se valorará su desplazamiento en campo. El proyecto SAAPIN está financiado mediante el programa de Proyectos Multidisciplinares del Gobierno de Aragón desde 2004. Se espera tener un prototipo operativo en el campo en 2008.

A. Cirujeda, D. Abadía*, J. Peña, S. González*, J. Paniagua*, T. Seco*, J. Aibar, C. Zaragoza • Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón. *Instituto Tecnológico de Aragón



Al mismo tiempo, la robótica ha dado soluciones que han aumentado la productividad en el sector industrial durante las últimas décadas, pero la agricultura no ha sufrido todavía un proceso de expansión equiparable. Para poder integrar esta tecnología en los campos de cultivo hace falta poder obtener gran cantidad de información del entorno y ser capaz de tratarla. Actualmente existen sensores que permiten conocer posiciones absolutas (GPS), posiciones relativas (balizas y tags), orientaciones, aceleraciones, velocidades propias y del entorno, inclinaciones e, incluso, reconocer tipos de elementos (visión).

Inicialmente, en el presente Proyecto también se ha desarrollado un sistema para la medida de la salinidad en el suelo y su cartografía, del que no se va a tratar en este trabajo.

Ejemplos de autómatas aplicados a protección vegetal

Un ejemplo es el robot ROJO, con el que trabaja el Instituto de Automática Industrial (IAI) del CSIC junto con la Universidad de Málaga, en el que se plantea un aparato capaz de navegar por GPS en un entorno de exteriores parcialmente conocido y de aplicar productos fitosanitarios (García-Pérez *et al.*, 2000).

Otro ejemplo es el proyecto de investigación financiado por la NASA, el USDA Agricultural Research Service y la compañía John Deere, en el cual se trabaja en la adaptación de un tractor para su navegación autónoma entre hileras de árboles frutales y se procede a la aplicación de productos fitosanitarios. El tractor pretende incorporar en la fase última del proyecto sensores de odometría, navegación basada en GPS, sistemas de visión para soporte a la navegación y a la detección de obstáculos (Stenz *et al.*, 2002).

Otro proyecto interesante es el MECH-WEED Project, fi-

Introducción

Una de las tareas más penosas y perennes del agricultor es la eliminación de las malas hierbas en las parcelas agrícolas. Por ello, este proyecto pretende obtener un sistema de desherbado de precisión basado en medios no contaminantes y que, mediante la robótica, reduzca la necesidad de la mano de obra, cada vez más costosa y escasa. El interés por los métodos de escarda de precisión se debe no sólo a la búsqueda de mayores rendimientos de los cultivos, sino también a una demanda social. La sociedad actual, muy sensibilizada con la protección del medio ambiente, demanda una reducción progresiva del uso de fitosanitarios, en particular de aquellos que causan un mayor impacto ambiental y cuya presencia de residuos en los alimentos o en el agua potable sea más probable.

Tratamientos selectivos en cereal de invierno mediante análisis de imágenes en tiempo real y controlado por GPS (Gerhards y Oebel, 2006).

nanciado por el Swedish Board of Agriculture y por Stiftelsen Lantbruksforskning (Suecia), que se enmarca en la línea de visión artificial y reconocimiento de hileras. Utiliza un vehículo autónomo que recorre campos de hileras de cultivo distinguiendo las plantas cultivadas de las malas hierbas mediante cámaras con técnicas de clasificación por reconocimiento de patrones (Åstrand y Boerveldt, 2002).

Finalmente, cabe citar el proyecto CROPS-COUT, donde se está trabajando en un robot autónomo siguiendo hileras de cultivo empleando para ello sistemas de visión, de ultrasonidos, infrarrojos y giróscopos. Este proyecto está siendo desarrollado a nivel de prototipo por el grupo holandés de Agrotechnology & Food Innovations de Wageningen (Henten *et al.*, 2005).

Pero los principales ejemplos en los que se inspira SAA-PIN son el prototipo californiano diseñado por Lee *et al.* (1999) que trabaja en el cultivo de tomate y usa herbicidas para el control de malas hierbas, y el de Gerhards y Oebel (2006), en Alemania, que han desarrollado un sistema de tratamiento herbicida localizado con pulverizadores convencionales distinguiendo diferentes grupos de malas hierbas del cereal de invierno.

En robótica, uno de los métodos más ampliamente usados para estimar la posición de un robot es la odometría. Se trata de una técnica de posicionamiento que emplea información de sensores para obtener una aproximación de la posición real de un sistema móvil en cada instante respecto una posición inicial. Sin embargo, la acumulación de errores de orientación causa grandes fallos en la estimación de la posición, los cuales van aumentando con la distancia recorrida por el robot. Por ello, sólo se cuenta con la odometría en aquellos casos en los que no se disponga de un sensor de mayor fiabilidad (Borenstein *et al.*, 1996).

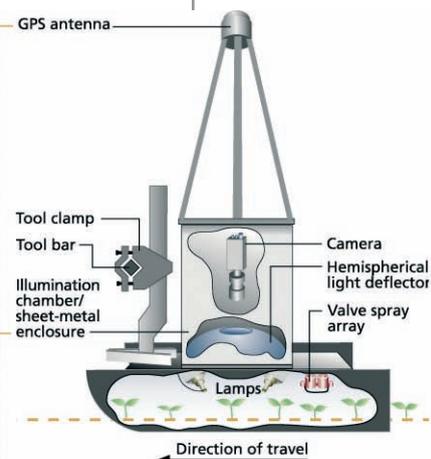
Técnicas de reconocimiento basadas en visión automática

Las técnicas de reconocimiento se pueden basar en características espectrales, morfológicas y de textura de las plantas.

En el primer grupo entran las técnicas que distinguen entre plantas y suelo. Éstas son usadas para realizar aplicaciones de productos fitosanitarios únicamente cuando hay presencia de plantas, sin diferencias de qué tipo de planta se trata, evitando aplicaciones innecesarias sobre el suelo desnudo.

Se emplean diferentes parámetros morfológicos para distinguir entre plantas de distintas especies. Gerhards y Oebel (2006) emplearon los parámetros de área foliar, compacidad, diámetros de Ferret y descriptores de Fourier sobre el contorno transformado de las hojas. Lee *et al.* (1999) emplearon área foliar, compacidad, elongación, logaritmo del ratio de altura y anchura, ratio de longitud / perímetro y el ratio de perímetro / anchura foliar.

En cuanto a las técnicas basadas en diferencias en tex-



tura, se encuentran menos referencias en la literatura, aunque Tshko y Favier (1998) las emplearon y encontraron aciertos superiores al 70%.

En cuanto al objeto a identificar, existen dos enfoques: se puede aspirar a identificar las plantas de cultivo o a distinguir tanto el cultivo como las malas hierbas en grupos. A título de ejemplo, Sogaard y Norremark (2004) basaron su trabajo en distinguir las plantas de remolacha azucarera; Gerhards y Oebel (2006), en cambio, trabajaron distinguiendo cultivo y malas hierbas específicas: remolacha azucarera y trigo, malas hierbas gramíneas, *Galium aparine*, *Matricaria chamomilla* y otras malas hierbas dicotiledóneas, en general. Como ejemplo de otro enfoque distinto cabe citar el trabajo de Philipp *et al.* (2004), que distinguieron dicotiledóneas de monocotiledóneas basándose en otra serie de índices, obteniendo un mayor acierto con el primer grupo de malas hierbas (99%) frente al 75% de aciertos con monocotiledóneas.

Objetivos

Dentro de este proyecto se pretende que el vehículo y los aperos asociados lleven a cabo las siguientes operaciones o procesos, empleando las metodologías y tecnologías más sencillas posibles:

1. Que el robot se desplace por el campo de maíz de forma autónoma, reconociendo las filas del cultivo.
2. Que el sistema discrimine las plantas de maíz de las malas hierbas dentro de la fila de cultivo usando técnicas de procesamiento de imágenes. Este proceso se llevará a cabo en estados de desarrollo del maíz entre tres y cuatro hojas (< 25 cm.).
3. Que el apero asociado realice un desherbado selectivo dentro de la fila de cultivo. La escarda entre filas es más sencilla y se puede realizar con un cultivador.

Así pues, se pretende proponer un sistema de escarda, que pueda servir tanto a los agricultores ecológicos como a aquellos convencionales que deseen diversificar sus procedimientos de manejo por cualquier razón (producción integrada, aparición de resistencias, problemas de contaminación, zonas vulnerables, etc.). Se ha escogido el cultivo de maíz no sólo por su importancia para el campo aragonés sino porque además, este cultivo tiene cierto

Cartografía de las malas hierbas en algodón mediante análisis de imágenes en tiempo real y controlado por GPS (Downey, Giles y Slaughter, 2004).

futuro como fuente agroenergética para la producción de bioalcohol y su escarda química está teniendo dificultades con la sustitución de la atrazina, la aparición de resistencias y la contaminación de acuíferos.

Desarrollo del prototipo SAAPIN

Actualmente se está trabajando en el desarrollo del prototipo, avanzando al mismo tiempo en los temas de la navegación autónoma, del reconocimiento de las plantas de maíz y del desherbado mecánico.

La metodología que se ha utilizado a lo largo del proyecto descompone el proceso en varias fases, centrándose las primeras en análisis de requerimientos y especificaciones del sistema, para pasar a una posterior fase de diseño y desarrollo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las observaciones realizadas en campo.

Para realizar estas operaciones se ha procedido primero a la selección de una plataforma capaz de desplazarse por el medio agrícola, para proceder a su adaptación mediante los sensores, elementos y actuadores necesarios.

La concepción del sistema autónomo se ha basado en la adaptación de un vehículo comercial de bajo coste que permita arrastrar un apero que incorpore los procesos de reconocimiento de las malas hierbas y las operaciones de escarda. Para ello se ha escogido el tractor cortacésped John Deere modelo LX289 que cumple con la mayoría de las características técnicas requeridas.



Minitractor cortacésped modelo John Deere LX 289 escogido para el Proyecto. Foto realizada durante pruebas de campo en cultivo de maíz en las instalaciones del CITA, en Montañana, Zaragoza.

Entorno de simulación

Previo a la adaptación del minitractor en el campo se ha desarrollado un entorno de simulación para evaluar diversas estrategias de navegación, gestionar el movimiento de un vehículo agrícola a través de campos de cultivo, para analizar las prestaciones del sistema y para determinar cuáles son los sensores más apropiados para todos y cada uno de los procesos. Para ello se ha modelizado adecuadamente la plataforma tractora, los sensores, el apero con (dimensiones aproximadas) y el entorno de trabajo. Con estas premisas se ha procedido a diseñar estrategias

de navegación para que se puedan realizar las operaciones de escarda. El simulador ha tenido en cuenta la definición del campo de cultivo (dimensiones y separación de filas de cultivo).

Relativo al sistema de navegación se ha obtenido una versión simulada donde se integra la información proveniente de los sensores seleccionados (sistema de visión, GPS, desplazamientos relativos angulares de las ruedas), se planifican trayectorias y se procede a seguir las hileras de maíz comandando el movimiento de la plataforma tractora. Se han analizado diferentes algoritmos para recorrer la superficie de cultivo autónomamente, analizando aspectos tales como la robustez y la tolerancia ante fallos de integración sensorial.

Adaptación del vehículo

Para que dicho vehículo pueda desplazarse autónomamente se tuvieron que realizar diferentes adaptaciones mecánicas.

La primera adaptación fue relativa a la dirección del vehículo con el fin de poder ser operada sin intervención humana. Para ello se escogió un motor que permitiera llevar la dirección de la posición central a cada uno de los extremos, en tiempos en torno al segundo, para poder realizar las maniobras con un tiempo de respuesta breve. El conjunto seleccionado de motor, junto a un reductor planetario, fue el ofrecido por Maxon.

La segunda actuación fue sobre la transmisión hidrostática encargada de fijar la velocidad a la que se desplaza el vehículo para automatizar la tracción del robot para que circulara a velocidad constante, pero con posibilidad de realizar marcha atrás y frenado. Para ello se escogió un motor lineal de la empresa Vascot.

Acoplamiento de sensores de visión

Tras realizar unas primeras pruebas en campo se decidió tapar todo el sistema de visión con una estructura cerrada para evitar sombras, que dificultan el reconocimiento de las plantas de maíz, y para frenar el viento que, al mover las plantas, dificulta también la identificación. Esta decisión obliga a su vez a diseñar la iluminación interior mediante la concatenación de leds de luz blanca, elegidas por su bajo consumo energético y por su baja emisión de calor. Se han colocado de forma que no produzcan sombra sobre las plantas. Debido a la presencia de otros mecanismos que desprenden calor también fue necesario diseñar un sistema de ventilación de la estructura.

También fueron necesarias otras actuaciones sobre el minitractor para poder incorporar los sistemas de visión como los sistemas de odometría responsables de registrar el desplazamiento angular de las ruedas, para los que se seleccionaron sensores inductivos, que detectan los pulsos generados por discos dentados acoplados en las ruedas del tractor. También se diseñó el sistema de alimentación compuesto por baterías, dos plataformas de control y el armario eléctrico conteniendo los cuadros aislados de polvo y el alternador.

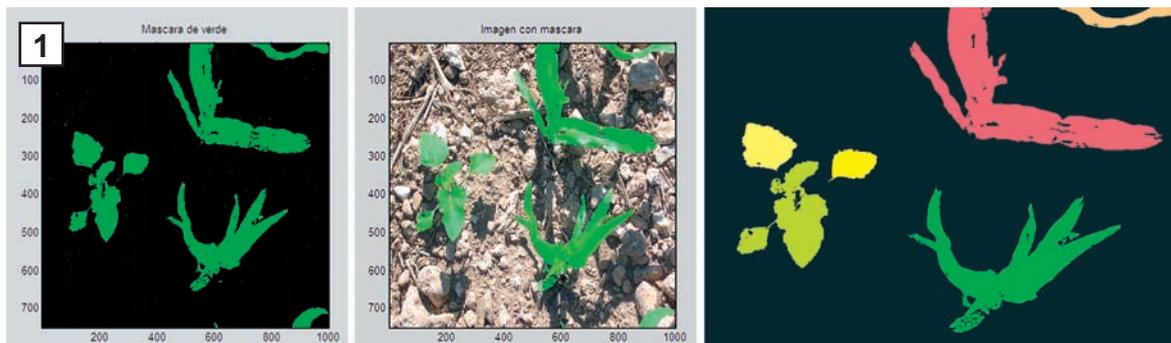


Imagen filtrada con la fracción verde seleccionada (izquierda), superpuesta a la foto original (centro) y después de agrupar los distintos objetos de color verde (derecha).

Para evitar posibles accidentes se prevé instalar un inclinómetro antivuelco, así como un sensor de ultrasonidos que evitará el choque del robot con obstáculos inesperados (aspersores, árboles, arquetas de riego). En la parte inferior del tractor se prevé colocar unas rejillas o vertederas para despejar la zona de escarda de piedras o terrones.

Para posibilitar la navegación dentro del campo se está empleando una cámara fotográfica industrial de altas prestaciones con la finalidad de reconocer las hileras. Actualmente, se han desarrollado y analizado dos estrategias diferentes de navegación, llegando a la conclusión de que para la navegación entre hileras es mejor un sistema abierto en el que se planifiquen las trayectorias en cada momento, siendo necesarios, como mínimo, un localizador local o global para obtener la posición, una brújula que permita orientarse y una cámara para mejorar las precisiones durante el guiado entre hileras y corregir los posibles errores del campo, tales como hileras desviadas o mal situadas. Así, en las cabeceras del campo la navegación se realizará en base a odometría, GPS y brújula.

- En los finales de parcelas se observaron curvas y solapamientos de líneas de siembra que dificultan la orientación del robot mediante el sistema de visión, por lo que se considera imprescindible utilizar otro tipo de sensores de posición y orientación para el guiado en estas zonas.
- La presencia de obstáculos como aspersores fijos en la parcela, puede causar la falta de espacio para el movimiento del mismo.
- En algunos casos, la presencia de arquetas de riego podía impedir el paso del robot.
- Mediante el sistema de guiado por reconocimiento de la fila se hace imposible plantear el uso de este robot, en principio, en campos regados con pivots. Para ello será necesario diseñar otro sistema diferente de guiado.
- Respecto al tipo de suelo se ha constatado la presencia de suelos muy pedregosos, en los que los cepillos de desherbado pueden sufrir un importante desgaste y falta de eficacia.

Reconocimiento de las plantas de maíz

Para realizar el reconocimiento de las plantas de maíz se cuenta con una primera versión basada en un sistema de visión. Para ello se renunció a usar cámaras que funcionan en espectros concretos como las empleadas por Gerhards y Oebel (2006) y, como ya se ha comentado, se empleó una cámara fotográfica industrial sin especiales complicaciones para abaratar el sistema. El reconocimiento se basó en reglas de identificación de patrones de maíz para discriminar las malas hierbas. En una primera fase se procedió a clasificar la fracción de la imagen que corresponde a plantas de acuerdo al color de cada píxel.

Los píxeles de color verde se agruparon como objetos y se procedió a un filtrado de la imagen en base al tamaño para descartar los menos significativos. En diversas ocasiones aparecen partes de las plantas seleccionadas como objetos diferentes, por lo que actualmente se está trabajando para detectar los tallos de las plantas y así poder agrupar las hojas como un solo objeto (**Figura 1 derecha**).

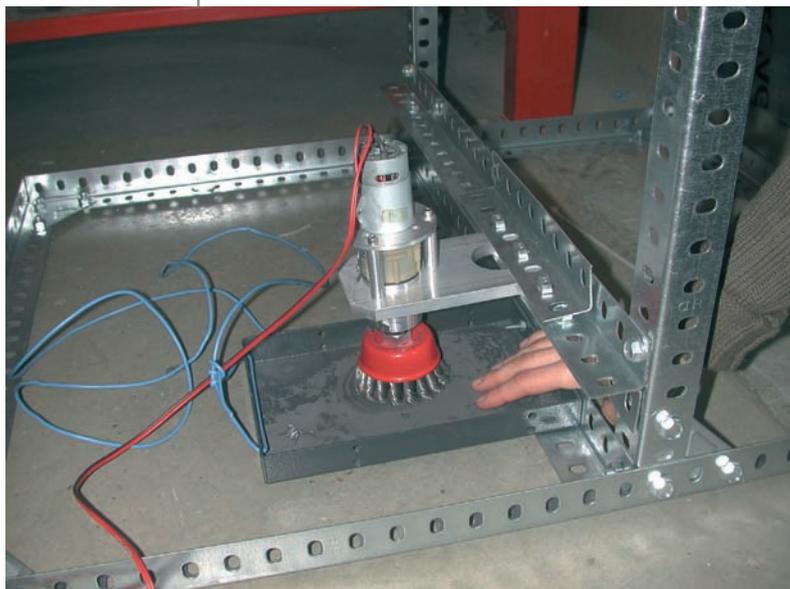
Finalmente, cada uno de estos objetos fueron clasificados por medidas basadas en 47 descriptores morfológicos. De entre ellos se seleccionaron los siguientes, por aportar información más fiable:

Área, eje mayor, eje secundario, centroide, el área en proporción de la longitud (ATL), la compacidad (CMP), el alargamiento (ELG), el logaritmo de la proporción de la altura a la anchura (LHW), la proporción de la longitud al pe-

Muestras en campo

Con el objetivo de evaluar la posibilidad de realizar un reconocimiento de las plantas de maíz basada en distancias entre plantas, se realizaron mediciones de las mismas durante la primavera de 2006 en ocho campos de maíz comerciales en distintas zonas de Aragón (Ejea de los Caballeros, Montañana, Almudévar y Lascasas). Se escogieron campos que fueron sembrados con distintos tipos de sembradoras, para comprobar la precisión real de las mismas. Para ello se marcaron 10 tramos lineales de un metro de longitud en cada campo y se midió la distancia tanto entre las diferentes plantas como la desviación de cada planta con la línea marcada. Los resultados indican que esta desviación es, en general, muy pequeña (promedio $0,4\text{cm} \pm 0,3\text{cm}$) mientras que la distancia entre plantas es muy irregular, especialmente en suelos pedregosos (promedio $18\text{cm} \pm 2\text{cm}$). Por ello, se considera imprescindible basar el reconocimiento de las plantas de maíz en parámetros morfológicos de las mismas y no se considera posible basarlo en los parámetros geométricos de la siembra del maíz.

Durante esta fase se detectaron también posibles problemas que pudieran surgir en la circulación del prototipo en el campo y en el desherbado mecánico previsto. Los principales son los siguientes:



Cepillo de eje vertical durante una prueba de calibración y que se utilizará para el control de las malas hierbas.

rímetro (LTP) y la proporción del perímetro a la anchura (PTB). Una vez determinados, se procedió al reconocimiento de plantas de maíz de otras usando diferentes algoritmos. Se eligió el algoritmo basado en redes neuronales por ser el más preciso. Actualmente se está trabajando en estos temas con la finalidad de alcanzar un porcentaje de acierto elevado, comparable al 61-82% conseguido por Tian (1995) (citado por Lee *et al.*, 1999) usando también cuatro parámetros o la tasa de acierto entre el 73 y el 86% conseguida por Gerhards y Oebel (2006).

Se ha decidido acoplar una cámara lateral para complementar la decisión para distinguir las plantas de cultivo de las malas hierbas. Las imágenes obtenidas verticalmente arrojan, con frecuencia, solapamientos de plantas de maíz y de malas hierbas que dificultan el reconocimiento del cultivo, como lo encontraron también Gerhards y Oebel (2006) para estados de desarrollo avanzados de cereal de invierno.

Elección del sistema de escarda

De entre los aperos más frecuentemente utilizados para el desherbado mecánico (Van der Schans y Bleeker, 2006) y discutidos por Norremark y Griepentrog (2004) se escogió un cepillo de eje vertical, ya que presenta las siguientes ventajas:

- Su velocidad de rotación es independiente de la velocidad de avance del robot.
- Es un apero que consigue una elevada eficacia sobre la mayoría de malas hierbas.
- La mayor eficacia se consigue en tamaños de las malas hierbas entre el estado de plántula y de cuatro hojas, y esto se corresponde con el momento de tratamiento en el que se quiere realizar (altura del maíz menor de 25 cm).
- Se trata de un mecanismo sencillo y de un tamaño adaptable al minitractor.
- En caso de desgaste de las púas es sencillo conseguir repuestos.
- Frente al uso de rejas o discos metálicos de cultivador se trata de un método más dirigido y menos agresivo pa-

ra el suelo y se espera una mayor selectividad respecto a las plantas de maíz.

- Frente a la escarda térmica presenta la ventaja de una mayor sencillez de manejo, mayor espectro de control de las malas hierbas y mayor posibilidad de dirigir el desherbado. Otra ventaja es un probable menor consumo de combustible fósil.

Una dificultad para el montaje es la necesidad de trabajar con un cepillo de reducido diámetro con el fin de poder introducirlo entre plantas de maíz sin dañarlas. Otra dificultad es el ajuste de la presión necesaria del cepillo sobre el suelo para tener suficiente eficacia sin alterarlo demasiado. Por supuesto, la eficacia de este apero no es completa, aunque se pretende maximizarla.

Próximas actuaciones

En cuanto se haya finalizado la adaptación del minitractor a los cambios necesarios y la instalación de los sensores descritos, se comprobará el movimiento del robot en campo con los algoritmos de navegación, integrando información sensorial para proceder a los giros en los finales de las líneas. En caso de que fuera necesario, se procederá a la adaptación del algoritmo diseñado en el entorno de simulación.

Seguidamente, se comprobará el grado de aciertos en el reconocimiento de plantas de maíz y de malas hierbas con imágenes tomadas con la misma luz con la que se realizará el entorno cubierto del minitractor para asemejar las imágenes de prueba con las imágenes reales a tomar en campo.

En la fase final se comprobará la capacidad de desherbado en campo y el daño producido sobre las plantas de cultivo, es decir, la eficacia y la selectividad de la escarda.

Conclusiones

El Proyecto SAAPIN avanza hacia la obtención de un vehículo agrícola capaz de desplazarse de forma autónoma por un campo de maíz, desherbando mecánicamente entre las plantas. En la actualidad se perfecciona un sistema de visión artificial para la discriminación de plantas, así como en el posicionamiento georeferenciado del vehículo. Se prevé realizar numerosos ensayos de campo los próximos años para tener el primer prototipo a finales de 2008.

Agradecimientos

A Fernando Arrieta, capataz de la Unidad de Sanidad Vegetal del CITA, por su valiosa ayuda. Al Programa de Proyecto Multidisciplinares del Departamento de Ciencia, Tecnología y Universidad del Gobierno de Aragón que financia este Proyecto (PM107/2006).

Bibliografía

La bibliografía de este artículo queda a disposición del lector en: acirujeda@aragon.es