

CONTROLADOR BORROSO MULTIVARIABLE PARA EL AJUSTE DE TRATAMIENTOS EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Xavier P. Burgos-Artizzu * Angela Ribeiro *
Matilde de Santos **

* Instituto de Automática Industrial, CSIC, Arganda del
Rey, España

** Facultad de Informática, Universidad Complutense de
Madrid, Madrid, España

Resumen: Se presenta un control borroso MIMO sobre una barra multisección de aplicación de tratamientos incorporada a un tractor, que controla la apertura y cierre de cada una de las secciones de la barra y la dosis de herbicida a aplicar en cada instante, actuando sobre el caudal de la barra y la velocidad del vehículo. La dosificación se determina a partir de los resultados suministrados por un sistema de procesamiento de imágenes que genera, para el campo a tratar, los mapas de distribución de mala hierba y estado de crecimiento de cultivo, a partir de un muestreo fotográfico. El controlador se ha desarrollado y simulado en Matlab con resultados muy satisfactorios que indican un ahorro significativo en la cantidad de herbicida a utilizar, manteniendo un alto nivel de eficacia en el tratamiento de las infestaciones. *Copyright ©2007 CEA-IFAC*

Palabras Clave: Control Borroso, Control multivariable, Agricultura de Precisión, Conocimiento experto

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha producido un importante avance con la aplicación de sistemas de control y automatización en agricultura apareciendo el concepto de Agricultura de Precisión (AP) que engloba un conjunto de técnicas de cultivo dirigidas a ajustar el uso de agroquímicos considerando la diversidad tanto del medio físico como del biológico (Kropff *et al.*, 1997). Lo que se traduce en una reducción de los costes de producción y una gestión agrícola más respetuosa con el medioambiente (Earl *et al.*, 1996).

Dentro de la AP tienen especial importancia las técnicas orientadas a la aplicación selectiva de tratamientos pues numerosos estudios experimentales demuestran que es posible reducir substan-

cialmente las dosis recomendadas de muchos productos sin que con ello se reduzcan significativamente ni su eficacia ni los rendimientos.

Un tratamiento selectivo requiere conocer la distribución poblacional de malas hierbas, pudiéndose distinguir diversas formas de medir la variabilidad espacial de las especies entre las que destacan los métodos discretos. En los muestreos discretos se recoge la información en los puntos de una malla de dimensiones dependientes del tamaño de la zona a tratar y de la heterogeneidad de la infestación. A partir de esta información discreta, se construye un mapa de infestación, utilizando distintas técnicas de interpolación (Cressie, 1991), para a continuación elaborar un mapa de tratamientos. El método de muestreo, aunque sencillo, es tedioso y costoso

ya que requiere el desplazamiento al campo de numeroso personal técnico.

Una forma de mejorar el procedimiento de adquisición de información en el campo es realizar un muestreo fotográfico georeferenciado, que puede ser llevado a cabo por un sólo operario no experto en identificación de malas hierbas. Posteriormente las fotos tomadas pueden ser analizadas visualmente en el laboratorio, evitando de este modo el estrés visual de la observación directa en campo. Un grado mayor de automatización es disponer de un sistema de visión artificial (Ribeiro *et al.*, 2005) que discrimine la mala hierba del cultivo en cada foto, determinando la cantidad de mala hierba, *Índice de cobertura*, y estimando el *Estado de crecimiento* del cultivo, ambos valores fundamentales para determinar la importancia de la infestación y por ende calcular la dosis de herbicida más adecuada. Con todos los valores obtenidos de las fotos del muestreo en campo se puede construir, utilizando técnicas de interpolación, dos mapas: a) mapa de infestación, en el que sólo figura información sobre la distribución mala hierba y b) mapa de cultivo en el que figura información sobre el estado de crecimiento del cultivo.

Una vez obtenidos los mapas el siguiente paso es realizar la actuación, es decir un tratamiento en dosis variable en el campo. Por tanto el objetivo es generar actuaciones sobre la barra de tratamiento del tractor de modo que la cantidad de herbicida suministrada se ajuste al mínimo necesario para eliminar eficazmente la infestación en cada punto. Para ello, en el presente trabajo, se propone un controlador sobre la barra de modo que ajuste el caudal de herbicida como respuesta a la salida del sistema de visión (mapa de infestación y mapa de cultivo), y que también controle la velocidad del tractor, ya que ésta influye en la cantidad y distribución del herbicida pulverizado.

En la siguiente sección se describe formalmente el problema, en términos de las entradas y salidas del controlador, así como las características y requisitos de la barra de tratamiento. En la sección 3 se analiza en detalle el controlador borroso desarrollado, explicando su estructura y funcionamiento. En la sección 4 se examinan los resultados en comparación con las prácticas agrícolas habituales. Para finalizar, en la sección 5 se exponen las conclusiones más relevantes de este trabajo.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

2.1 Tractor y Barra de Tratamiento de Herbicida

El tractor a usar es de la casa John Deer. Es importante destacar que el motor de este tractor, igual que el de muchos tractores modernos,

funciona en régimen constante de revoluciones por minuto, denominado toma de fuerza, por lo que la variación de velocidad en este tipo de vehículos no se realiza a través de un actuador continuo (acelerador), como en los coches, si no de un variador de velocidad discreto, que sólo permite un conjunto determinado de valores, lo que debe tenerse en cuenta en la etapa de diseño del controlador, ya que no son posibles todos los valores de salida. En la etapa de integración del control propuesto se tiene previsto realizar la actuación sobre el variador de velocidad a través de un motor eléctrico unido a una biela, más adelante se estudiará la conveniencia de utilizar un actuador hidráulico.

La barra de tratamiento es una HARDI NK, de 10 metros de longitud, con 5 secciones con control de apertura y cierre independiente de 2 metros cada una. El equipo consta además de un depósito de 400 litros, de una bomba que lleva el líquido hasta los brazos de pulverización y de sensores que permiten determinar el estado del equipo en cada instante (presión de trabajo, caudal, secciones abiertas, etc.). El control de apertura y cierre es simultáneo de modo que en el mismo instante pueden estar abiertas varias secciones de la barra mientras el resto permanecen cerradas. Es importante resaltar que, en una situación como la descrita, todas las secciones abiertas tendrán el mismo caudal. En la figura 1 se muestra una de las secciones de la barra de aplicación de tratamientos y en la figura 2 se muestra un esquema de operación del equipo. La actuación sobre el caudal en la etapa de integración del controlador propuesto se realizará utilizando el sistema de ajuste del volumen del líquido (punto 8 en el diagrama) que suministra el propio fabricante.



Figura 1. Detalle de una sección de la barra de aplicación de tratamientos

2.2 Requisitos del Controlador

Como ya se comentó la información del entorno que tiene el controlador le viene dada como entrada en forma de dos mapas: el mapa de infestación (*Índice de cobertura* de cada punto) y el mapa de cultivo (*Estado de Crecimiento* de cada punto). El primer mapa suministra información

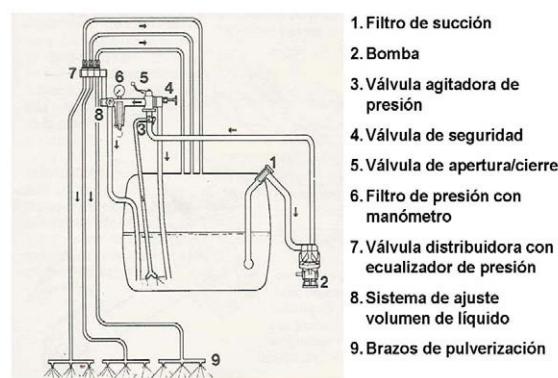


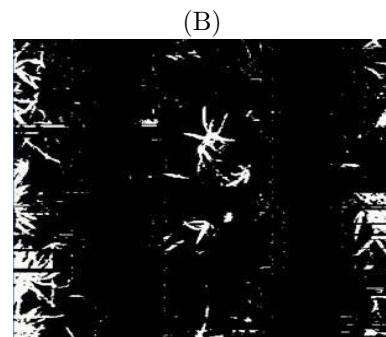
Figura 2. Diagrama de operación del equipo de tratamiento HARDI NK.

de la cantidad y de la distribución de mala hierba presente en el campo, mientras que el segundo es necesario para poder ajustar convenientemente la dosis de herbicida, ya que ante valores idénticos de *Índice de Cobertura*, la infestación es potencialmente más peligrosa en estados de crecimiento temprano que en estados de crecimiento avanzado; no sólo porque la infestación pueda multiplicarse al crecer el cultivo sino también porque un cultivo incipiente es más frágil que uno bien desarrollado. Los mapas se obtienen a partir de la información suministrada por un muestreo fotográfico georeferenciado del campo y el posterior procesamiento de cada una de las imágenes recogidas mediante un sistema de visión artificial (Ribeiro *et al.*, 2005). En pocas palabras, el sistema de visión segmenta la imagen utilizando un índice de color que permite discriminar la vegetación presente en la foto (figura 3A) del resto, tal como se muestra en la figura 3B. En este punto podemos contabilizar tanto el número de pixeles de la imagen que pertenecen a la capa vegetal como el correspondiente a suelo. A continuación se localizan las líneas de cultivo, con lo que se puede saber qué porción de la imagen corresponde a cultivo. Eliminando las líneas anteriores (figura 3C), los pixeles que quedan en la imagen corresponden a zonas de mala hierba (figura 3D). Utilizando los valores calculados para suelo, cultivo y mala hierba podemos estimar tanto el *Índice de cobertura* como el *Estado de Crecimiento*. A partir de los valores discretos de *Índice de cobertura* y el *Estado de Crecimiento* se construyen los mapas con valores continuos de infestación y cultivo utilizando una técnica de interpolación (Cressie, 1991).

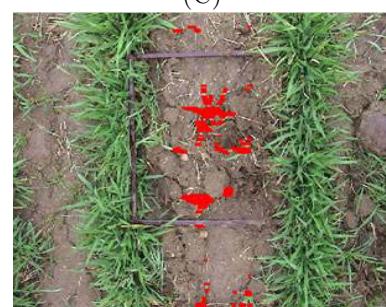
En cuanto a los muestreos, pueden realizarse a pie o en un vehículo dependiendo de las dimensiones del campo. En los muestreos realizados hasta la fecha se comienza recorriendo una línea completamente muestreando cada 8m, una vez terminado el muestreo de esa línea, se selecciona una nueva línea paralela a una distancia de 2m. El procedimiento se repite hasta inspeccionar el campo completamente. Para localizar los puntos



(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 3. Ejemplo de procesamiento con el Sistema de Visión.

de muestreo se utiliza un GPS con corrección diferencial Omnistar. Las dimensiones de la malla de muestreo están relacionadas con la precisión de los mapas, de modo que cuanto más pequeña sea la malla más precisos serán los mapas de infestación y cultivo. Esto último tiene dos claros límites, por un lado el control mínimo en la actuación sobre la barra de aplicación de herbicida que no justifica mallas de muestreos inferiores al elemento mínimo de control, en este caso a 2m, y por otro el coste asociado a la operación de muestreo, que puede ser importante en campos grandes. Además a la hora de elegir las dimensiones más adecuadas para la malla conviene saber

el tamaño mínimo de los rodales de mala hierba a tratar.

En la figura 4 se muestran las entradas y salidas del controlador implementado. El controlador tiene como entradas el *Índice de Cobertura y Estado de Crecimiento* y como salidas el caudal de pulverización en 1/min y la velocidad del tractor en km/h, ya que la dosis de herbicida aplicada en cada instante viene determinada por el caudal y la velocidad. Las salidas del controlador, velocidad y caudal, se han definido como valores de ajuste (aumentar/disminuir) sobre los valores de entrada de velocidad y caudal y así los valores reajustados retroalimentan la siguiente iteración. La salida de control que resta actúa la apertura y el cierre de las 5 secciones de la barra de aplicación de tratamientos.

Figura 4. Entradas y Salidas del Controlador

Un requisito muy deseable (y muy extendido) para cualquier controlador es que produzca el menor número posible de cambios en los actuadores que controla, es decir, que realice mínimas variaciones sobre la salida. En este caso, además, resulta más conveniente actuar sobre la velocidad que sobre el caudal, ya que el variador de velocidad es mucho más flexible, preciso y robusto que el regulador de caudal de la barra de tratamiento, expuesto a mayor inestabilidad. Además el caudal afecta directamente al tamaño de la gota que debe tener unas características determinadas para asegurar la asimilación adecuada del tratamiento por parte del cultivo, lo que deja poco margen de actuación sobre el caudal. En resumen, siempre que se deba reducir/aumentar la cantidad final de herbicida aplicada, es mejor aumentar/reducir la velocidad que reducir/aumentar el caudal.

3. CONTROLADOR BORROSO

El controlador debe recibir como entrada las dos variables de los mapas creados por el sistema de visión, el último caudal utilizado y la velocidad actual del tractor, y a partir de estos datos controlar la cantidad y distribución de herbicida actuando sobre la barra de tratamiento, modificando el caudal y abriendo o cerrando las distintas secciones, y sobre el variador de velocidad del tractor, modificando la velocidad de avance del

tractor. Debido a la independencia de la apertura y cierre de cada sección, y a que cada una cubre un área bastante grande (2 m), el sistema propuesto razona independientemente sobre cada una de las secciones de la barra. Así, en cada instante el controlador procesará de forma independiente 5 zonas distintas de los mapas (5 valores medios de Índice de Cobertura y 5 valores medios de Estado de Crecimiento), generando el control de apertura o cierre para cada una de las 5 secciones. La velocidad se ajustará al mínimo de las 5 velocidades calculadas para cada sección y el caudal al máximo de los 5 valores de caudal calculados para cada sección.

Para el diseño del controlador no se dispone inicialmente de ningún modelo del comportamiento que debe seguir el controlador ni ningún modelo del sistema a controlar. Lo único que se tiene es el conocimiento del experto, es decir, se puede conocer la conducta de un agricultor experimentado que, conduciendo el tractor, tuviese control sobre la barra de tratamiento. Este tipo de conocimiento es muy difícil de plasmar en un controlador clásico, ya que se basa en reglas muy intuitivas y con incertidumbre. La Teoría de Conjuntos Borrosos formulada por L.A. Zadeh en 1965 y la teoría básica presentada posteriormente para el diseño de Controladores Borrosos (Zadeh, 1973) resulta de gran utilidad en casos como este (Lee y Dexter, 2001).

Esta forma de lógica difusa, en contraposición a la Lógica Clásica, permite la representación de valores imprecisos. Las variables en Lógica Borrosa toman valores en un intervalo de confianza de 0 a 1, y posteriormente se combinan mediante reglas borrosas para llegar a un valor final. Esta forma de lógica ha sido muy usada en todo tipo de aplicaciones y especialmente en control (García-Alegre, 1991; Albertos, 2004).

3.1 Estructura Principal

A la hora de modelar un sistema mediante Lógica Borrosa hay varias configuraciones posibles, tanto para la estructura de las reglas como para la forma en la que se opera o la forma en la que transforma la salida de nuevo a un valor no borroso. Para el controlador propuesto esto último es necesario, pues los actuadores necesitan una entrada analógica.

En este caso se ha escogido por su sencillez el método de implicación de Mamdani, donde tanto los antecedentes como los consecuentes son proposiciones borrosas. Las funciones matemáticas seleccionadas para las operaciones de *AND*, *OR* y reconversión a valores no borrosos han sido respectivamente las funciones: *MIN*, *MAX* y *Centroide*, ya que suelen dar buenos resultados.

En los siguientes secciones se describen los conjuntos borrosos y las reglas borrosas definidas para el controlador implementado.

3.2 Conjuntos Borrosos

En la figura 4 se mostraban las entradas y salidas del controlador. Todas las entradas toman un valor continuo dentro de un rango especificado, que varía entre una entrada y otra debido a su distinta naturaleza. Dicho valor se debe transformar en un conjunto borroso para su posterior uso como antecedente en las reglas de inferencia del controlador. Para llevar esto a cabo, se definen las funciones de pertenencia mostradas en la figura 5. En todas ellas la forma trapezoidal de los conjuntos se ha preferido a otras por su sencillez y su mayor rapidez de cómputo.

La figura 5A muestran los conjuntos borrosos perteneciente a la variable *Índice de Cobertura* (IC). El rango de valores, al ser un porcentaje, va desde 0 a 100. La caracterización de IC se ha hecho en 4 conjuntos (nada, poco, medio y mucho). En los extremos (mucho y nada), siempre se aplicará la dosis de herbicida máxima o mínima (nada de herbicida), y se pueden diferenciar claramente cuándo hay poca mala hierba de cuándo hay una cantidad importante de infestación. El valor de los rangos ha sido escogido con la ayuda de un grupo de expertos en *malherbología*. El *Estado de Crecimiento* (figura 5B) se ha representado de forma similar con 3 conjuntos (bajo, medio y alto).

La Velocidad (figura 5C) varía entre 0 y 8 (en kilómetros por hora), que son las velocidades habituales del tractor en tareas de laboreo. El caudal (figura 5D) ha sido normalizado aunque se considera como máximo los 400 litros por hectárea de los que es capaz la barra de tratamiento HARDI NK. La caracterización de la Velocidad se ha hecho en 5 conjuntos mientras que la del Caudal se ha hecho en sólo 3 conjuntos. De esta forma se está dando prioridad y haciendo más flexible la actuación sobre la Velocidad, ya que como se ha dicho con anterioridad es preferible actuar sobre la Velocidad antes que sobre el Caudal.

Del mismo modo, las salidas son conjuntos borrosos definidos por las funciones de pertenencia mostradas en la figura 6, que se usarán para la reconversión a valores no borrosos, dando lugar a las señales de control reales. Aquí la velocidad y el caudal no son valores absolutos, sino el valor de incremento o decremento que el controlador considera que se debe aportar sobre la velocidad y caudal de entrada. Por ello, la velocidad oscila entre $[-5, 5]$ (5 km/h más rápido o más despacio), y el caudal entre $[-1, 1]$ (bajar del todo o subir del todo). Igual que ocurría para las entradas al

(A)

(B)

(C)

(D)

Figura 5. Funciones de pertenencia de los conjuntos borrosos de entrada

controlador, la Velocidad está caracterizada en cinco conjuntos mientras que el Caudal sólo en 3.

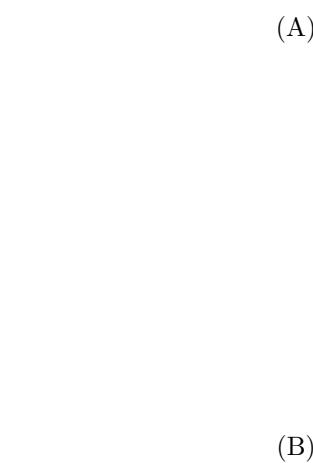


Figura 6. Funciones de pertenencia de los conjuntos borrosos de salida

La otra salida (sección) tiene dos posibles valores (abrir y cerrar sección), por lo que no es necesario ningún conjunto borroso para representarla.

3.3 Reglas Borrosas

Una vez convertidas las entradas a conjuntos borrosos, se aplican las reglas de inferencia para hallar las salidas. Para el diseño de las reglas, como ya se comentó, ha sido necesario el conocimiento de un experto (lo más relevante de este conocimiento se resume en la Tabla 1). Las filas representan el valor de entrada (conjunto borroso) de *Índice de Cobertura* (IC), mientras que las columnas representan el valor de entrada del *Estado de Crecimiento* (EC). El valor de las casillas representa la cantidad de herbicida a aplicar, donde 0 significa no aplicar tratamiento, 1 aplicar la dosis máxima, 1/2 aplicar media dosis y 1/4 aplicar un cuarto de dosis. Los expertos en la materia consideran suficiente esta separación de las posibles dosis, y no recomiendan añadir mayor complejidad. Cómo ya se explicó al definir los conjuntos de *Índice de Cobertura* (IC), los dos extremos (Nada y Mucho) son aquellos en los que siempre se aplica dosis mínima de herbicida o dosis máxima respectivamente, dando igual el valor del *Estado de Crecimiento* (EC). Sin embargo los dos conjuntos (Poco y Medio) dependen del *Estado de Crecimiento*, ya que cuando el cultivo está

poco crecido la mala hierba es potencialmente más peligrosa, por lo que hay que emplear más herbicida.

Tabla 1. Reglas obtenidas a partir de conocimiento experto

IC/EC	Poco	Medio	Alto
Nada	0	0	0
Poco	1/2	1/2	1/4
Medio	1	1	1/2
Mucho	1	1	1

Por otro lado la actuación del controlador debe ajustar la apertura/cierre de sección, el caudal y la velocidad para alcanzar una dosis adecuada a cada situación. El ajuste es sencillo, por ejemplo para alcanzar una dosis mínima basta cerrar la sección, no dejando pasar nada de herbicida. Para el resto de valores, basta abrir la sección y combinar la velocidad con el caudal teniendo en cuenta que a mayor caudal más cantidad de tratamiento aplicada. Con la velocidad pasa lo contrario, ya que cuánto más rápido va el tractor menos tiempo pasa por encima de la mala hierba y por tanto el tratamiento pulverizado por unidad de terreno es menor. Esto se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Ajuste de la salida

Velocidad	Caudal	Dosis Herbicida
Mínima	Bajo	1/2
Mínima	Medio	1
Mínima	Alto	1
Baja	Bajo	1/2
Baja	Medio	1/2
Baja	Alto	1
Media	Bajo	1/4
Media	Medio	1/2
Media	Alto	1/2
Alta	Bajo	1/4
Alta	Medio	1/4
Alta	Alto	1/2
Máxima	Bajo	1/4
Máxima	Medio	1/4
Máxima	Alto	1/4

Combinando ambas tablas se forman las reglas borrosas: se miran los valores de *Índice de Cobertura* (IC) y de *Estado de Crecimiento* (EC), para saber que dosis hay que alcanzar (Tabla 1), y con dicho valor se varía el caudal y velocidad de entrada hasta alcanzar el valor deseado (Tabla 2). Siempre se prefiere cambiar la velocidad al caudal, y se procura actuar sólo cuando es imprescindible.

4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

La versión inicial del sistema se ha desarrollado y probado en el entorno de desarrollo Matlab.

Se ha considerado un campo de 200 metros de largo por 80 de ancho (4 idas y vueltas del tractor), con una separación entre líneas de cultivo

de 37cm. Los mapas de *Índice de Cobertura* y de *Estado de Crecimiento* se generan aleatoriamente (aunque siguiendo unas restricciones que aseguran que los mapas generados representan situaciones y mapas reales), para de este modo comparar distintas situaciones. Todos estos valores son ajustables por parámetro y se pueden cambiar entre ejecuciones. Esto se ha hecho con objeto de disponer de una simulación lo más realista y versátil posible.

La figura 7 muestra un ejemplo de ejecución. Las dos primeras imágenes (A y B) presentan los mapas de *Índice de Cobertura* y de *Estado de Crecimiento* generados. Nótese como en el mapa de *Índice de Cobertura* aparecen rodales (como en los campos reales), y como en el mapa de *Estado de Crecimiento* aparecen líneas con una distribución semejante a la de un cultivo. La figura 7C representa, para su mejor comprensión, la salida del controlador en forma de mapa de dosificación de herbicida.

Por otra parte, la figura 8A muestra los cambios sufridos por el variador de velocidad a lo largo del tiempo y la figura 8B los cambios sobre el caudal. Analizando en detalle estas figuras, comprobamos que los cambios efectuados sobre la velocidad y el caudal son pocos y que, como queríamos, la actuación es mayor sobre la velocidad que sobre el caudal (un 10.1% de veces se actúa sobre la velocidad frente a un 1.1 % de actuación sobre el caudal). También se ve que los cambios sobre el caudal son bastante bruscos, debido a que al minimizar la actuación sobre el caudal ésta sólo se realiza finalmente con carácter de urgencia, siendo un cambio drástico.

Finalmente, se ha efectuado un breve estudio sobre el comportamiento del controlador en 20 situaciones distintas generadas aleatoriamente. Dicho estudio muestra que el controlador opta, la mayor parte de las veces (56,8 %) por no aplicar dosis máxima, lo cual se traduce, al compararse con las prácticas habituales de aplicación de herbicida (a dosis fija en todo el campo), en que el sistema produce mapas de dosificación en los que de media se emplea 9,51 veces menos herbicida que aplicando dosis máxima y 4,758 veces menos que con media dosis. Aunque éstas son cantidades que suelen disminuir al trasladarse a la realidad, debido a todas aquellas variables que no aparecen en las simulaciones, como pueden ser el viento o la resistencia de las plantas, no dejan de ser cantidades que evidencian el claro éxito de la aplicación de técnicas de Agricultura de Precisión en contraste con las técnicas clásicas, y como las tecnologías propias de la automática y la informática pueden resultar de gran utilidad en el ámbito agrícola como también lo demuestran otras aplicaciones (Martínez *et al.* 2005).

(A)

(B)

(C)

Figura 7. Simulación del sistema completo. Mapa de Índice de Cobertura (A), mapa Estado de crecimiento (B) y mapa de dosificación, resultado del controlador (C).

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un controlador multivariable para una barra multisección de aplicación de tratamiento que integrada en un tractor comercial permite el tratamiento selectivo de malas hierbas en cultivos, uno de los puntos centrales de la llamada Agricultura de Precisión.

El controlador desarrollado usa la salida de un sistema de visión artificial configurado como dos mapas que indican la distribución de la infestación y la gravedad de la misma para actuar directamente sobre los distintos elementos del tractor, mini-

(A)

(B)

Figura 8. Evolución de la acción de control de velocidad (A) y de la acción de control de caudal(B).

mizando gastos y ejerciendo un control inteligente. Para su diseño e implementación se ha usado la Lógica Borrosa lo que permite tratar adecuadamente la imprecisión de los datos de entrada, así como la incertidumbre sobre la actuación.

Los resultados obtenidos con las primeras pruebas y simulaciones son muy alentadores ya que sin pérdida de calidad en los cultivos (se sigue eliminando toda la mala hierba), se consigue ahorrar en el mejor de los casos hasta un 89% de herbicida. Este caso podría corresponder al caso real de un campo de cultivo de cereal de invierno que es tratado anualmente y que presenta rodales esporádicos.

REFERENCIAS

- Albertos P. y A. Sala (2004). Control borroso. Una metodología integradora. *RIAI 2004*, **1**(2), pp. 22–31.
- Cressie N. (1991). *Statistics for spatial data*. Wiley Series in Probability and Statistics(John Wiley and Sons Ltd (Eds)), New York (EEUU).
- Earl, R., P.N. Wheeler, B.S. Blackmore y R.J. Godwin (1996). Precision Farming: The management of variability. *Landwards* **51**(4), pp. 18–23.
- García-Alegre, M. C. (1991). Inteligencia Artificial en el Control de Procesos: controladores borrosos. *Mundo Electrónico*, **214**, pp. 42–49.
- Kropff, M.J., J. Wallinga y L.A.P. Lotz, (1997). Modelling for precision weed management. *Precision Agriculture: spatial and temporal variability of environmental quality(Ciba Foundation Symposia)*(John Wiley and Sons Ltd (Eds.)), England. Wiley, pp. 182–204.
- Lee P.S. y A.L. Dexter (2001). A Fuzzy Approach to Fault Diagnosis in the Presence of Sensor Bias. In *FUZZ-IEEE 2001*, pp. 1585–1588
- Martínez M., X. Blasco, J.M. Herrero, C. Ramos y J. Sanchis (2005). Monitorización y control procesos. Una visión teórico-práctica aplicada a invernaderos. *RIAI 2005*, **2**(4), pp. 5–24.
- Ribeiro A., C. Fernandez-Quintanilla, J. Barroso y M.C. Garcia-Alegre (2005). Development of an image analysis system for estimation of weed pressure. *Precision Agriculture 05* (J.V. Stafford (Ed)), pp. 169–174.
- Zadeh, L.A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Trans. on Systems, Man & Cybernetics* **3**, 28-44.

6. AGRADECIMIENTOS

La investigación ha sido financiada por los proyectos: CICYT-AGL2005-06180-C03-03, CICYT-DPI-2006-14497 y PRICIT-CAM-P-DPI-000176-0505 (ROBOCITY2030). Los autores agradecen el asesoramiento del grupo de *Protección Vegetal* del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) así como la inestimable ayuda, en campo, de Pedro Hernáiz, responsable de la Finca Experimental de La Poveda, y de su equipo. El primer autor disfruta de una beca/contrato CSIC de Formación del Personal Investigador (FPI).