

Identificación de yemas axilares en plántulas de papa basada en un sistema de visión con lógica difusa

Identification of axillary buds of potato seedlings based on a vision system with fuzzy logic

Martínez Corral L¹, E Martínez-Rubin², F Flores-García³, M Vázquez-Rueda³, J Frías-Ramírez², MA Segura-Castruita²

Resumen. La papa (*Solanum tuberosum* L.) es un cultivo cuya producción a nivel nacional es muy inferior en comparación con los países más productivos. Esta situación se debe en parte a que es un cultivo parcialmente mecanizado, con prácticas agronómicas deficientes e inadecuadas, bajos niveles de tecnificación y gran cantidad de jornales de trabajo requeridos para una hectárea de cultivo. La necesidad de generar técnicas y procedimientos modernos que incrementen la producción, calidad y rendimiento del cultivo, han propiciado el desarrollo de proyectos destinados al mejoramiento de plántulas libres de patógenos con materia de alta calidad genética, fisiológica y sanitaria. La utilización de un sistema de visión para el reconocimiento visual computarizado de la región de corte en la planta que favorezca su propagación, implica el análisis y procesamiento de determinados descriptores estadísticos de un objeto obtenidos de una imagen digital. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un sistema de visión dirigido a la extracción y tratamiento de información de una imagen para la identificación de meristemas o yemas en plántulas de papa el cual presente razonamiento mediante un conjunto de reglas basadas en lógica difusa igualmente diseñadas e implementadas en el programa propuesto. Los resultados probaron una eficiencia del 96% de los casos de la identificación de yemas axilares en una planta; esto fue posible con una mínima intervención humana a través de la interfaz visual del programa, que combina el procesamiento digital de imágenes con los algoritmos de control difuso especializados para este fin.

Palabras clave: Papa; Yemas axilares; Sistemas de visión; Inteligencia artificial.

Abstract. Potato (*Solanum tuberosum* L.) is a crop whose production yield at national level is very low compared with that in the most productive countries. This is because it is a partially automated crop with deficient and inadequate agronomic practices, low technification levels and great quantity of work wages required per hectare of cultivation. The necessity to generate technical and modern procedures that increase crop production, quality and yield has fostered development of projects leading to obtain seedlings free of pathogens with material of high genetic, physiological and sanitary quality. Utilization of a vision system for the computerized visual recognition of the cut region in the plant that favors its propagation implies the analysis and processing of certain statistical descriptors of an object obtained from a digital image. The objective of this work was to develop a vision system focused on the extraction and treatment of image information for the identification of plant axillary buds in potato seedlings which presents reasoning through a group of rules based on equally designed diffuse logic and implemented in the proposed program. The results proved 96% effectiveness in the cases of identification of plant axillary buds; this was possible with a minimum human intervention through a visual interface of the program, which combines the digital image processing with specialized diffuse control algorithms to this end.

Keywords: Potato; Plant axillary buds; Vision systems; Artificial intelligence.

¹ Departamento de Investigación, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Av. Tecnológico No. 1555 sur, Periférico Gómez-Lerdo km. 14.5, Cd. Lerdo, Durango, México.

² Departamento de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro km. 7.5, Ejido Anna. Torreón, Coahuila, México.

³ Instituto Tecnológico de la Laguna. Blvd. Revolución y Clzda. Cuauhtémoc s/n Torreón, Coahuila, México.

Address Correspondence to: Dra. Luime Martínez-Corral. Tel. 52(871)7250949. e-mail: luime_mc18@yahoo.com.mx

Recibido / Received 21.IX.2010. Aceptado / Accepted 23.XII.2010.

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es un cultivo cuyo rendimiento de producción a nivel nacional es muy inferior en comparación con los países más productivos. En el 2007, en México se sembraron 64709 ha obteniéndose una producción de 1,75 millones de toneladas con un rendimiento de 27,1 ton/ha (FAO, 2009). Esta situación de baja productividad, se debe en gran medida a que es un cultivo parcialmente mecanizado, con prácticas agronómicas deficientes e inadecuadas, bajos niveles de tecnificación y el requerimiento de una gran cantidad de jornales de trabajo para una hectárea de cultivo.

Hoy en día, la técnica de micro-propagación *in vitro* es utilizada para producir una gran cantidad de plántulas de papa genéticamente idénticas, partiendo de meristemos o yemas axilares; las yemas axilares son fragmentos de plantas que se encuentran en la base de las hojas y son separadas con una finalidad reproductiva. La propagación *in vitro* de plántulas de papa se lleva a cabo cortando nudos con una yema axilar con hojas de 0,2 a 0,5 cm de longitud; las hojas grandes se disecionan con cuidado y los nudos son cultivados en recipientes que contengan el medio de cultivo; de esta forma, la yema crecerá en tres o cuatro semanas y se desarrollará una nueva plántula, con otras seis o siete yemas disponibles (Gonzalos y Vilca, 1998). No obstante, en la utilización de este procedimiento para propagar las plantas con éxito, es necesario conocer las manipulaciones mecánicas y procedimientos técnicos cuyo dominio requiere de cierta práctica y experiencia. Esta técnica implica una ardua labor en la selección del punto de corte del órgano, el cual es definido por inspección visual del agricultor. Por naturaleza, esta inspección visual del hombre está sujeta a un proceso altamente subjetivo debido a la complejidad inherente en la percepción visual humana (Shahin y Symons, 2001). La determinación del punto de corte de la planta para su propagación mediante un sistema de visión artificial ofrece una alternativa potencial para automatizar esta práctica manual de selección a la vez que estandariza la técnica.

Recientemente se ha incrementado el número de aplicaciones donde se utilizan los sistemas de visión artificial para mejorar o automatizar algún proceso de la industria agroalimentaria (Raji y Alamutu, 2005). Una de las aplicaciones más documentadas de los sistemas de visión es la clasificación de frutos por medio de robots de cosecha. La clasificación puede ser por tamaño y forma, color o presencia de defectos. Heinemann et al. (1996) desarrollaron una estación de inspección automatizada para la clasificación de papas basada en su forma y tamaño. El análisis se llevó a cabo a razón de tres papas/min y los resultados de clasificación se vieron afectados hasta en un 20% con el movimiento de las papas en comparación con las estacionarias. Más tarde, Noordam et al. (2000) diseñaron un sistema de visión para verificar la calidad de las papas, en donde consideraba los defectos de color externo además del tamaño y la forma; el sistema incorporaba unas

bandas transportadoras para acarrear las papas hacia y desde la unidad de visión, con una capacidad de 12 ton/h haciéndolo adecuado para su integración en una línea de embalaje. Pedreschi et al. (2006) plantearon un sistema de visión para medir el color de papas fritas a diferentes temperaturas; el análisis de la coloración fue calculado, a diferencia de los métodos convencionales, sin destruir la muestra, y el sistema cuantificó características tales como manchas café y otros defectos que permitieron relacionarlas con la calidad del producto.

Los avances en la tecnología de procesamiento de imágenes y los sistemas de visión han propiciado un aumento en el interés por el desarrollo de nuevas técnicas para la interpretación de los datos y el reconocimiento de patrones. El grado de complejidad que se puede llegar a alcanzar se extiende a los sistemas expertos basados en el conocimiento, entre los que se incluyen la lógica difusa, las redes neuronales, las técnicas neuro-difusas y los algoritmos genéticos (Corona et al., 2000; Killing et al., 2009).

La lógica difusa es una técnica reciente que está siendo explorada en aplicaciones de agricultura como una nueva tecnología que imita los patrones del pensamiento humano en el control de operaciones de equipo industrial (Pahsa, 2006). Para la agricultura, la subjetividad de la lógica difusa es particularmente atractiva ya que las condiciones del suelo y de los cultivos crean una situación compleja de modelar para los métodos de evaluación convencionales (Benson et al., 2000).

La implementación del control por medio de lógica difusa se caracteriza porque es fácil de implementar, gracias a que el conocimiento se expresa a través de un conjunto de reglas lingüísticas de tipo SI *antecedente* ENTONCES *consecuente* en lugar de sofisticadas ecuaciones diferenciales (Passino y Yurkovich, 1998); es comprensible aún cuando no se tengan antecedentes del proceso a controlar, y presenta capacidad para realizar una inferencia a partir de una información incompleta dado que maneja ambigüedad, imprecisión e incertidumbre (González y Woods, 1996).

El procesamiento difuso de imágenes se define como la colección de todos los alcances que interpretan, representan y procesan a las imágenes, sus segmentos y características como conjuntos difusos (Tizhoosh, 1997). Las técnicas difusas se han aplicado con éxito a diferentes dominios del procesamiento de imágenes [por ejemplo en el filtrado de ruido (Van De Ville et al., 2003) y en morfología (Burillo et al., 2003), entre otras]. El procesamiento difuso es deseable en la visión artificial debido a las inexactitudes que existen en muchos aspectos del procesamiento de imágenes. Estudios previos con imágenes tratadas con algoritmos secuenciales de regresión lineal probaron que (1) la solución al problema planteado converge antes que la imagen sea completamente procesada (Benson et al., 2000) y (2) el tratamiento con técnicas convencionales resulta en un número exponencial de reglas que incrementen la complejidad de cómputo (Pan et al., 1998).

Shahin y Symons (2001) evaluaron la capacidad de un sistema de visión para clasificar el color de granos de lentejas mediante una red neuronal multicapa. La red neuronal probó ser una alternativa rápida para la clasificación presentando una certeza de clasificación de hasta el 90% de las pruebas. Ríos et al. (2008) explicaron una metodología para la extracción de las propiedades de la papa utilizando el procesamiento de imágenes; la calidad del producto fue evaluada utilizando sus características físicas, y recurriendo a una red neuronal artificial encontraron las deformaciones y defectos. El modelo probó ser estable y con alta velocidad de convergencia, por lo que se consideró apropiado para inspecciones en tiempo real. Benson et al. (2000) desarrollaron un algoritmo para un sistema de visión dirigido a la identificación de los bordes del cultivo y el control de una máquina segadora; la rutina de lógica difusa programada parametrizó la guía de corte del borde del cultivo.

En las grandes actividades de huerta o de campo abierto, todavía se efectúa una gran parte de la actividad horticultural a mano, y su principal problema radica en la realización de tareas tediosas y repetitivas (Tian et al., 1997). Algunas de estas labores implican la operación visual del técnico, que después de un periodo de tiempo relativamente corto, ve afectada su agudeza visual. Bajo este contexto, se planteó como objetivo de este trabajo presentar una herramienta que proporcione la capacidad de imitar el razonamiento del operador en la identificación de las yemas axilares de una plántula de papa, simulando la acción visual y decisiva del técnico en la selección del punto de corte mediante un sistema de visión combinado con un algoritmo de lógica difusa.

MATERIALES Y MÉTODOS

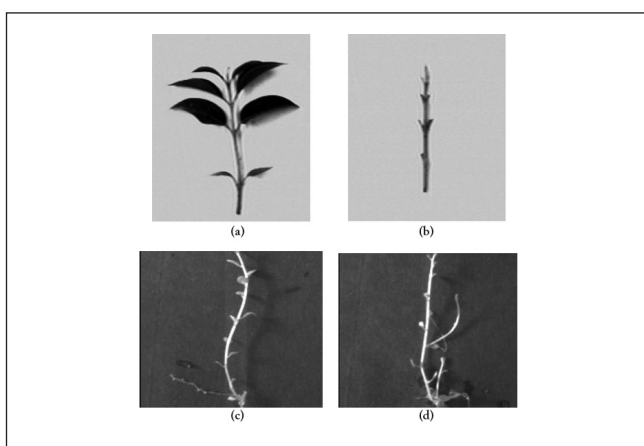
Para el sistema de visión se utilizó una computadora Pentium con procesador de 1.6 GHz y 128 GB en RAM funcionando bajo Microsoft Windows XP. Se utilizó una cámara EDC-1000E (Electrim Corporation, Princeton, NJ, EUA) conectada a una tarjeta adquisitoria de imágenes DFG/LC2 (The Imaging Source Corporation, Charlotte, NC, EUA).

Los algoritmos para el sistema de visión al igual que para el controlador difuso, fueron desarrollados en un sistema de control autónomo diseñado bajo la plataforma Visual Basic 6 (Microsoft Corp., Redmond, WA). Las imágenes fueron capturadas a una altura de 40 cm de la región de interés de la planta (ROI), y todas colocadas en la misma disposición bajo condiciones de iluminación controladas evitando fuentes luminosas externas a las establecidas para el sistema. Las muestras de material vegetal correspondieron a plántulas de papa y plantas de ficus. Debido a que las plántulas de papa y las plantas de ficus exhiben el mismo proceso de reproducción (mediante esquejes de yema), se optó por incluir muestras de plantas de ficus a fin de comprobar el desempeño del sistema ante alteraciones de tamaño en el tallo o la presencia de hojas. Para las muestras, se

utilizaron tallos con yemas axilares de plántulas de papa en su etapa primaria de crecimiento (libres de plagas o enfermedades), plantas completas (tallos y hojas) y tallos de ficus. En la Fig. 1 se muestran imágenes capturadas por el sistema correspondiente a plantas de ficus y plántulas de papa.

Fig. 1. (a) y (b) Imágenes de plantas y tallos de ficus; (c) y (d) Imágenes de plántulas de papa.

Fig. 1. (a) and (b) Plant and stem images of ficus; (c) and (d) Potato seedlings images.



Algoritmo de procesamiento de imágenes. El principio de operación del sistema está basado en el procesamiento de imágenes capturadas ya sea en tiempo real o bien mediante la utilización de imágenes previamente capturadas. El programa permitió manejar imágenes con resoluciones hasta de 640 x 480 píxeles.

Para extraer la ROI de la imagen que corresponde a la ubicación de la yema axilar, esta imagen se convirtió a tonos de grises (8 bits, 256 tonos diferentes) y se segmentó utilizando la técnica de segmentación por umbral simple (González y Woods, 1996). Se generó una imagen binaria utilizando un umbral definido por el usuario. El procesamiento de la imagen se llevó a cabo mediante técnicas morfológicas como erosión, dilatación, negativo, apertura y cierre entre otras, para realzar las características buscadas, reducir ruido, rellenar huecos e identificar contornos y así obtener un objeto uniforme (Lee et al., 1999; Kim et al., 2004). Para la identificación de regiones, el programa dividió la imagen en áreas no conectadas entre sí y generó los descriptores estadísticos para cada una de estas regiones. Los estadísticos extraídos de la imagen son el área, media y la desviación estándar (González y Woods, 1996).

Control difuso. La determinación del punto de la coordenada de corte se llevó a cabo mediante evaluación difusa. Los controladores difusos son diseñados para automatizar la acción del operador en un sistema particular (Passino y Yurkovich, 1998). Se desarrolló un modelo difuso de convergencia de cuatro entradas con una de salida. Las variables área, media, desviación estándar y la anchura en X sirvieron de entrada, mientras que

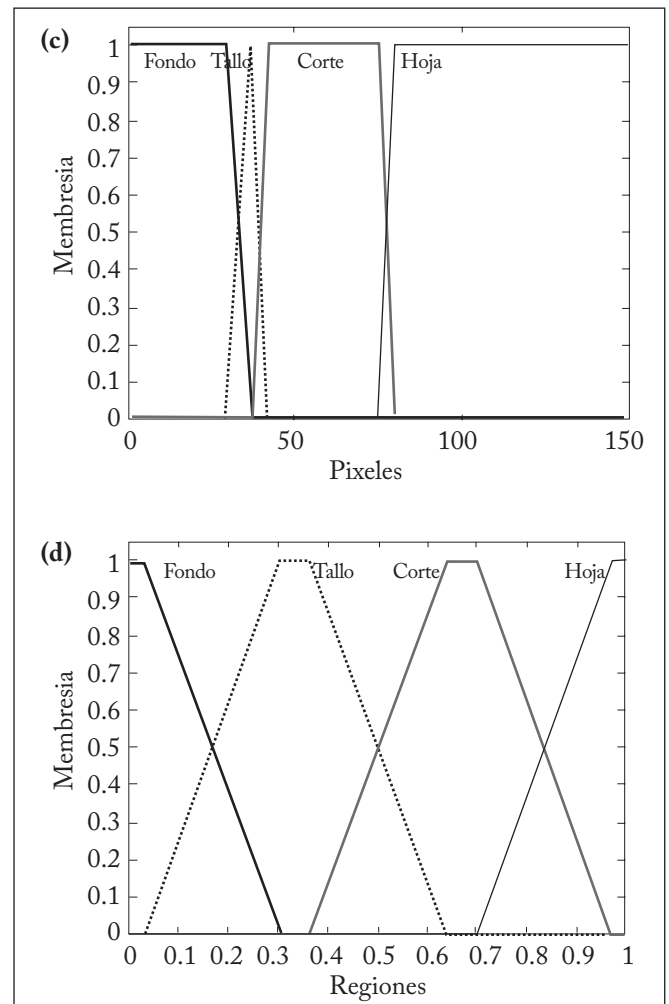
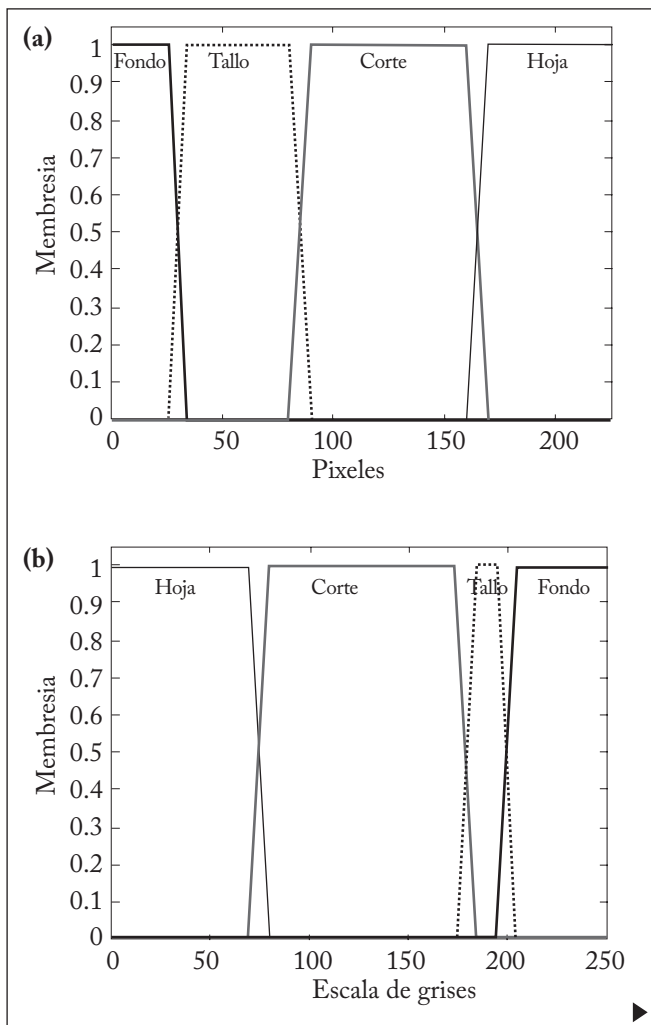
la variable ROI fue la de salida. Las coordenadas de la ROI no son propiamente una salida del sistema, pero son devueltos por el sistema para ubicar la herramienta de corte.

La Fig. 2 muestra las funciones de membresía utilizadas; las funciones de membresía aplicadas son de forma trapezoidal y triangular con valores de fondo, tallo, corte y hoja. El método de defusificación empleado para estas variables fue el centro de gravedad.

La descripción lingüística de la operación que cimienta la base de conocimientos del sistema simula la acción decisiva del operador en el momento de ubicar la yema axilar y realizar el corte. Para esto, el sistema consideró la cantidad de píxeles que aparecen en la subimagen, la conectividad de éstos y su tono de gris. La base de conocimientos del controlador difuso se basó en las siguientes descripciones lingüísticas (además de sus combinaciones y variantes):

Fig. 2. Funciones de membresía de la variable: (a) área, (b) media, (c) desviación estándar y (d) ROI.

Fig. 2. Membership functions of the variable: (a) area, (b) mean, (c) standard deviation and (d) ROI.

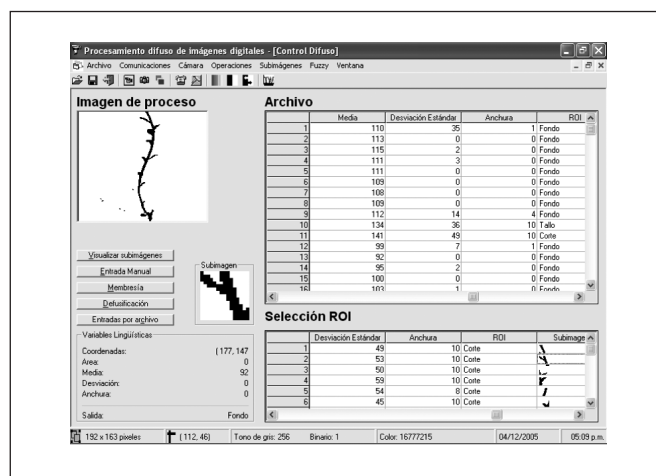


- Por cantidad de píxeles se determinó si existió presencia o ausencia de un objeto en la subimagen, y dependiendo de este valor se sugirió el órgano de la planta bajo inspección.
 - A mayor conectividad de píxeles se sugirió la existencia de un órgano amplio de la planta.
 - La baja tonalidad de gris en la subimagen indicó una mayor concentración de color en el órgano analizado; este índice aumentó en la medida que se eliminó la presencia del objeto.
- Dado que las propiedades y características para describir la región de interés (yema axilar) eran muy pobres, se consideró refinar la descripción de las características de los otros objetos que pudieran existir en la imagen; de este modo, se crea un mayor discernimiento entre la región de interés (yema axilar) y los objetos restantes de la imagen.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 3 muestra la pantalla de resultados del programa. En esta pantalla se incluye la imagen capturada y procesada, diez subimágenes con sus descriptores extraídos y la clasificación de región.

Fig. 3. Pantalla de resultados del controlador difuso.
Fig. 3. Display results of fuzzy controller.



En la depuración del controlador se utilizaron las imágenes de plantas de ficus completas (tallo, yemas axilares y hojas), imágenes de ficus conformadas únicamente por tallo y yemas axilares y por imágenes de plántulas de papa que aunque se mostraban completas, no se apreciaban en su totalidad las hojas de las plantas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

La variable área permitió distinguir entre el fondo de la imagen, la hoja de la planta, el tallo o la yema axilar mediante un conteo de píxeles de la subimagen. Las variables media y desviación estándar ofrecieron un identificador de tono de gris del órgano, y la variable anchura en x permitió establecer la conectividad entre los píxeles de la imagen y diferenciar entre una hoja, el tallo o la yema axilar.

Para las plántulas de papa, en los casos no identificados como corte, se presentaron los siguientes factores: el corte de la unión entre el tallo y la hoja fue muy cercano al tallo dejando muy poco tejido para identificar como yema axilar en la subimagen (podría confundirse con una deformación en el tallo); el tejido de

Tabla 1. Resultados obtenidos del controlador difuso con diferentes imágenes.

Table 1. Results obtained by the fuzzy controller with different images.

Datos de la imagen	1	2	3	4	5	6	7
Número de casos	304	304	304	304	270	270	288
Número de casos no definidos	1	1	0	0	1	5	2
Número de casos mal identificados	10	10	3	3	6	7	8
Casos identificados como corte	13	9	7	3	12	15	15
Casos reales de corte	10	8	8	6	16	13	14
Porcentaje de error total (%)	3,289	3,289	0,986	0,986	2,592	4,444	3,472

la yema axilar estaba en su etapa más temprana de crecimiento, aún cuando su grosor fue grande, no presentó el ancho suficiente como para realizársele el corte; la unión tallo y hoja contuvo parte de la hoja. Las subimágenes obtenidas por el controlador difuso para dos de las imágenes mostradas en la Fig. 1 se observan en las Figs. 4 y 5. Se puede observar que los puntos de las muestras que el controlador difuso reconoce además de la yema axilar como región de corte son el inicio de la hoja y la región donde el tallo comienza a engrosarse para dar lugar a la yema axilar. Estos puntos son identificados ya que representan el corte superior (la parte basal de la hoja) y el corte inferior (en el tallo) en la planta. Las coordenadas generadas por el sistema son enviadas a la herramienta de corte vía comunicación serial.

El modelo lógico difuso proporcionó una optimización de tiempo en la determinación de las coordenadas de corte en comparación con un modelo convencional basado en correlaciones; este diseño por correlación representó demasiadas iteraciones estadísticas que prolongaban los tiempos de procesamiento y por ende resultaba ineficiente para el sistema. En cuanto a la determinación alcanzada por el sistema en los casos identificados como no propicios para corte debido al grosor de la yema, se estima que puede mejorarse la exactitud del mismo obteniendo los descriptores morfológicos de: razón de longitud al perímetro, razón área/perímetro y elongación que mencionan Tian et al. (1997) en su trabajo. La rotación de la muestra

Fig. 4. Subimágenes obtenidas por el controlador difuso para la imagen (a) de la Fig. 1.

Fig. 4. Subimages obtained by the fuzzy controller for the image (a) of Fig. 1.

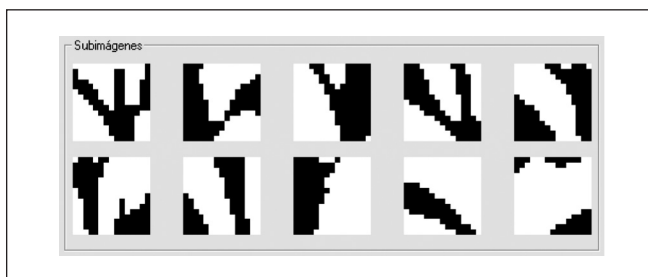


Fig. 5. Subimágenes obtenidas por el controlador difuso para la imagen (c) de la Fig. 1.

Fig. 5. Subimages obtained by the fuzzy controller for the image (c) of Fig. 1.



puede ser susceptible a modificar el descriptor de anchura en x, para lo que se sugiere en un futuro implementar funciones de extracción de momentos invariables a cambios de rotación y escalamiento como lo indican Noordam et al. (2000).

CONCLUSIONES

En la base de las nuevas biotecnologías de desarrollo de materia vegetal, las técnicas de aislamiento de órganos de las plantas son sometidas a la apreciación del observador. El sistema de visión creado permite automatizar esta tarea al ser capaz de identificar la ubicación de las yemas axilares de una planta a partir de una imagen digital. Mediante la implementación de un control inteligente basado en lógica difusa, el sistema permite además tener el control para la realización de los cortes en la planta al definir automáticamente las coordenadas de este punto, reduciendo el tiempo invertido por el técnico, a la vez que se compensa el deterioro visual impuesto por un trabajo tan repetitivo.

El programa desarrollado ofrece flexibilidad, escalamiento, programación modular e independencia total de programas alternos especializados en procesamiento de texto u hojas de cálculo para la apertura y manipulación de los archivos gráficos o de reportes. La interfaz visual gráfica permite de una forma sencilla navegar con total transparencia entre la adquisición de imágenes, funciones de procesamiento, controlador difuso, comunicación con la herramienta de corte y la gestión de archivos.

El sistema presentó buenos resultados identificando correctamente un 96% de los casos analizados de cada imagen utilizada y obteniendo las regiones de interés buscadas. El modelo lógico difuso proporcionó una optimización de tiempo en el análisis de los descriptores de una imagen y dadas las características del sistema, éste presenta un alto potencial como herramienta para la investigación agropecuaria.

REFERENCIAS

- Benson, E.R., J.F. Reid, Q. Zhang y F.A.C. Pinto (2000). An adaptive fuzzy crop edge detection method for machine vision. Presented at the 2000 Annual International Meeting. Paper No. 001019. ASAE, 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085-9659 USA.
- Burillo, P., N. Frago y R. Fuentes (2003). Fuzzy morphological operators in image processing. *Mathware & Soft Computing* 10: 85-100.
- Corona, S.T., G. Almaguer y R. Maldonado (2000). Sistema computarizado experto en diagnóstico nutricional en naranjo. *TERRA Latinoamericana* 18: 173-178.
- FAO (2009). Año Internacional de la papa 2008. Nueva luz sobre un tesoro enterrado. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 148 p.
- González, R.C. y R.E. Woods (1996). "Tratamiento digital de imágenes", Editorial Addison-Wesley / Diaz de Santos. Wilmington, Delaware, EUA. 773 p.
- Gonzalos, O.C. y J. Vilca (1998). Micropropagación vegetativa "in vitro" de aliso (*Ainus acuminata*). Asociación Civil para la Investigación y Desarrollo Forestal (ADEFOR). Cajamarca, Perú. 71 p.
- Heinemann, P.H., N.P. Pathare y C.T. Morrow (1996). An automated inspection station for machine-vision grading of potatoes. *Machine Vision and Applications* 9: 14-19.
- Killing, J., B.W. Surgenor y C.K. Mechefske (2009). A machine vision system for the detection of missing fasteners on steel stampings. *International Journal of Advance Manufacturing Technology* 41: 808-819.
- Kim, K.M., J.J. Park, M.H. Song, I.C. Kim y C.Y. Suen (2004). Detection of ridges and ravines using fuzzy logic operations. *Pattern Recognition Letters* 25: 743-751.
- Lee, W.S., D.C. Slaughter y D.K. Giles (1999). Robotic weed control system for tomatoes. *Precision Agriculture* 1: 95-113.
- Noordam, J.C., G.W. Otten, A.J.M. Timmermans y B.H. van Zwol (2000). High speed potato grading and quality inspection based on a color vision system. Proceedings of SPIE. *The International Society for Optical Engineering* 3966: 206-217.
- Nyongesa, H.O. y P.L. Rosin (2000). Neural-Fuzzy Applications in Computer Vision. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 29: 309-315.
- Pahsa, A. (2006). Morphological image processing with fuzzy logic. *Havacilik Ve Uzay Teknolojileri Dergisi* 3: 27-34.
- Pan, J., G.N. DeSouza y A.C. Kak (1998). FuzzyShell: A large-scale expert system Shell using fuzzy logic for uncertainty reasoning. *IEEE Transactions on fuzzy systems* 6: 563-581.
- Passino, M.K. y S. Yurkovich (1998). Fuzzy Control. Editorial Addison-Wesley. Menlo Park, CA. EUA. 495 p.
- Pedreschi, F., J. León, D. Mery y P. Moyano (2006). Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. *Food Research International* 39: 1092-1098.
- Raji, A.O. y A.O. Alamu (2005). Prospects of computer vision automated sorting systems in agricultural process operations in Nigeria. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Vol VII. 12 p.
- Ríos, C.R., I. López J.I. y H. Sheng (2008). ANN Analysis in a vision approach for potato inspection. *Journal of Applied Research and Technology* 6: 106-119.
- Shahin, M.A. y S.J. Symons (2001). A machine vision system for grading lentils. *Canadian Biosystems Engineering* 43: 7.7-7.14.
- Tian, L., D.C. Slaughter y R.F. Norris (1997). Outdoor field machine vision identification of tomato seedlings for automated weed control. *Transactions of the ASAE* 40: 1761-1768.
- Tizhoosh, H. R. (1997). Fuzzy Image Processing. Publisher: Springer-Verlag. Kartoniert (TB), Deutsch. 242 p.
- Van De Ville, D., M. Nachtegaal, D. Van der Weken, E.E. Kerre, W. Philips y I. Lemahieu (2003). Noise reduction by fuzzy image filtering. *IEEE Transactions on fuzzy systems* 11: 429-436.