

Digital recording of temporal sequences of images applied to the analysis of the phenological evolution of maize crops

Sandra Serafino¹, Benjamin Cicerchia^{1 3}, Juan P. Mitriatti¹, Agustín Balmer¹, Martín Faroppa¹,
Claudia Russo^{1 2}, Hugo Ramón^{1 2}

¹ Instituto de Investigación y Transferencia en Tecnología (ITT), Escuela de Tecnología, Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA) – Centro Asociado de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. De Bs. As. (CIC)

² Investigador Asociado de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. De Bs. As. (CIC)

³ Becario de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. De Bs. As. (CIC)

Sarmiento y Newbery (CP 6000), Junín, Buenos Aires, Argentina. Teléfonos (0236) 4636945/44

[sandra.serafino, lucas.cicerchia, agustin.balmer, martin.faroppa, claudia.russo, hugo.ramon](mailto:sandra.serafino,lucas.cicerchia,agustin.balmer,martin.faroppa,claudia.russo,hugo.ramon@itt.unnoba.edu.ar)@itt.unnoba.edu.ar; juan.mitriatti@gmail.com

Abstract — This paper intends to implement registration of images to temporal sequences of maize crops digitally sensed in field trials through the use of a robotic platform. The navigation of trials of this platform equipped with visible and multispectral light sensors, and the registration processes used allow us to generate “stacks images” by different genetic varieties of maize with the aim of obtaining a phenological characterization of them, and to compare them. In addition to the basic problems of displacement, lighting, and angle of the different captures, there is the drawback that the objects (plants) are not the same and in many cases also not similar to the previous images (different phenological stages). Added to this is the complexity of sensing the images in outdoor environments, and in particular the general conditions in the field (uneven path surface, climatic conditions). The proposed algorithms are part of the generation of multilayer digital image data banks that allow, through other digital analysis and processing techniques, the automated identification and interpretation of different characteristics for the determination of the response of the different genetic varieties of corn that is studied.

Keywords — Precision agriculture. Digital registration. Stack Images. Processing and digital analysis of images.

I. INTRODUCCIÓN

El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria lleva a cabo estudios de mejoramiento genético de maíz en ensayos a campo, en pos de la mejora de sus rindes de forma no automatizada. La UNNOBA trabaja en conjunto con la Estación Experimental Agropecuaria del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Pergamino, en el

diseño, y desarrollo de un sistema integrado de navegación y sensado en campo automatizado para relevamiento de parámetros biofísicos en diferentes estados fenológicos del maíz. Entre sus objetivos se encuentra la generación de bancos de datos de imágenes digitales, que permitan identificar y evaluar el estado de la variabilidad genética de las plantas de maíz tanto por surco como por parcela para todos los canteros del ensayo (una parcela incluye dos surcos, un cantero incluye varias parcelas y un ensayo puede incluir muchos canteros).

El relevamiento de dichos datos mediante imágenes digitales se logra recorriendo cada ensayo en forma automatizada con una plataforma robótica que incluye un sistema de cámaras de luz visible y multiespectrales para el sensado por parcela. Este relevamiento es temporal y puede llevarse a cabo varias veces por semana durante el desarrollo del cultivo. Cada relevamiento genera un volumen de imágenes considerable en función de la cantidad de parcelas que incluya el ensayo.

Este conjunto de imágenes son el inicio del proceso de registración, que permita identificar cada planta a partir de la cual se generará un stack de imágenes por planta, surco, parcela y ensayo.

La registración de imágenes consiste en superponer dos o más imágenes de la misma escena que fueran tomadas en diferentes momentos, desde diferentes puntos de vista o incluso capturadas por diferentes sensores.

Existen diferentes métodos de registración de imágenes, Brown [1] planteo un primer estado del arte, luego en 2003 Zitova y Flusser [2] realizaron una nueva clasificación de

técnicas de registraci3n y ya en 2013 Sharma y Gooyal [3] podemos encontrar un estudio basado en clasificaci3n.

Todos ellos coinciden en que las aplicaciones pueden ser divididas en 4 grupos respecto a c3mo fueron adquiridas las im3genes:

- De diferentes puntos de vistas (an3lisis multi-*vista*)
- En diferentes instantes de tiempo (an3lisis multi-temporal), puede incluir diferentes condiciones
- Con diferentes sensores (an3lisis multi-modal)
- Utilizaci3n de un modelo junto con la escena

Esta registraci3n es aplicada en diferentes 3reas tem3ticas como puede ser la medicina para el caso de im3genes deformadas [4], im3genes de radiograf3a de t3rax [5], tratamiento de pr3stata [6] o en im3genes card3acas [7], o en visi3n por computador en un estado de arte de geo-localizaci3n visual [8]. En cuanto a im3genes ligadas al agro, se pueden destacar aquellas relacionadas con sensado remoto con un resumen de t3cnicas [9], una introducci3n [10] o diferentes t3cnicas de mapeo a3reo [11] o detecci3n de regiones [12] con veh3culos a3reos no tripulados.

En el presente trabajo el objeto (planta de ma3z) permanece inm3vil y es la c3mara montada sobre la plataforma la que se encuentra en movimiento. Al estar la plataforma en movimiento sobre un terreno irregular como es el campo la imagen sobre la misma parcela nunca suele ser igual. Es por ello que suele haber un desfase entre las diferentes im3genes tomadas para una misma parcela (an3lisis multi-*vista*), donde las im3genes adem3s se toman en diferentes momentos (an3lisis multi-temporal) y con diferentes tipos de sensores (an3lisis multi-modal). As3 tendremos los mismos surcos, como m3nimo, desplazados horizontalmente en cada imagen, y/o rotados en alg3n sentido y 3ngulo, y/o sujetos a diferentes tipos de iluminaci3n, lo que nos dejar3 variaciones no s3lo de contraste sino tambi3n de color. Y por otro lado, la dificultad inherente que implica que los objetos (plantas de cultivos) no ser3n visualizados del mismo modo en todos los casos, puesto que est3n sujetos adem3s a su evoluci3n fenol3gica (crecimiento). Com3nmente cuando se registran im3genes, los objetos est3n desplazados o transformados de alguna forma, pero no var3an demasiado en sus caracter3sticas propias. En nuestro caso, adem3s de la problem3tica b3sica del desplazamiento tendremos el inconveniente de que los objetos no ser3n los mismos y en muchos casos tampoco parecidos a las im3genes anteriores debido a que estar3n en estadios fenol3gicos diferentes.

En cuanto a la metodolog3a de registraci3n Zitova y Flusser [2] mencionan que en la mayor3a de los casos la registraci3n consta de 4 pasos:

1. Proceso de detecci3n de caracter3sticas
2. Proceso de comparaci3n de caracter3sticas
3. Estimaci3n del modelo de transformaci3n
4. Transformaci3n y remuestreo de la imagen

El presente trabajo cuenta con 2 procesos de registraci3n, por un lado para la identificaci3n de los surcos y por otro para la identificaci3n de cada planta en particular, donde ambos poseen estos 4 pasos. En el desarrollo del trabajo los pasos no se encuentran identificados con t3tulos del modo que mencionan los autores. En ambas registraciones el paso

1 es compartido y se desarrolla en “III Detecci3n de objetos de inter3s (Plantas)”, luego en la registraci3n de parcelas el paso 2, 3 y 4 se encuentra desarrollado en “IV Algoritmos de registraci3n de im3genes secuenciales” particularmente en “Determinaci3n de surcos mediante identificaci3n de centros de masa y ajuste lineal de m3nimos cuadrados” el paso 2 y en “Registraci3n por surcos de toda la secuencia temporal” el paso 3 y 4. En la registraci3n de las plantas en “IV Algoritmos de registraci3n de im3genes secuenciales” particularmente en “Determinaci3n de centros de masa por planta” el paso 2 y en “Registraci3n de plantas por surco de toda la secuencia temporal” el paso 3 y 4.

En el caso de la registraci3n es imposible realizar una generalizaci3n de m3todos a aplicar, aunque a veces algunas t3cnicas utilizadas puedan compartirse dependiendo el problema, algunas de las utilizadas en el presente trabajo pueden encontrarse en la bibliograf3a como en [13].

II. SECUENCIAS TEMPORALES DE IM3GENES

Las im3genes que son captadas por los sensores de la plataforma rob3tica tienen caracter3sticas comunes. La principal es compartir la resoluci3n espacial. Se trabaja en general con im3genes de 640x480 p3xeles, de 24 bits de profundidad en espacio de color RGB, en el caso de las c3maras de luz visible. Las im3genes multiespectrales se trabajan por separado, dado que las mismas no se toman en todos los estadios del cultivo, por lo que es posible que no existan en todos los relevamientos que se hagan de un ensayo. Si se necesitan y en consecuencia se toman en alguna fecha, estas im3genes se trabajan en formato RAW, de 2048x1536 p3xeles, tambi3n de 24 bits de profundidad. Las mismas deber3n ser preprocesadas para integrarse a la image stack resultante de los algoritmos de registraci3n.

Otra caracter3stica com3n es la altura y la orientaci3n de los sensores a la hora de captar la escena. Todas las im3genes se toman desde arriba a una distancia fija, dependiendo del tipo de relevamiento que se requiera. En este caso en particular las im3genes se tomaron a 1,8 mts de altura, con una c3mara de gran angular (120°).

Existen varios aspectos a tener en cuenta. C3mo puede observarse en la figura 1 a) y b), las im3genes captan escenas de 2 surcos o m3s, dependiendo de la ubicaci3n del sensor al momento del disparo y de la capacidad angular de la c3mara. En estos casos la imagen se procesa teniendo en cuenta s3lo los surcos centrales de la escena y descartando la informaci3n de los bordes. La figura 2 muestra los surcos que se consideran para el proceso de registrado y los surcos que se descartan en cada imagen. Este preproceso se realiza para individualizar las parcelas en forma correcta, dado el campo de visi3n de la c3mara en cada disparo, si bien la misma se centra en el medio de una parcela, inevitablemente captar3 tambi3n los surcos aledaños a la misma.

Otro aspecto importante es la posibilidad de identificar las plantas en forma un3voca dentro de cada imagen. Dado que se trata de plantas en estado de crecimiento, que son sembradas a una distancia espec3fica unas de otras en el surco (15 a 20 cms aproximadamente), llegar3 un momento de su evoluci3n en el que la escena se transforme en una sola masa de hojas sin que sea posible identificar a qu3

planta pertenece qué hoja, tal como se visualiza en la figura 3.



Fig. 1. Maíz en estadios iniciales a) Imagen de un ensayo de maíz tomada de frente (V4/V5), b) Imagen tomada de arriba de parcelas (V1/V2)

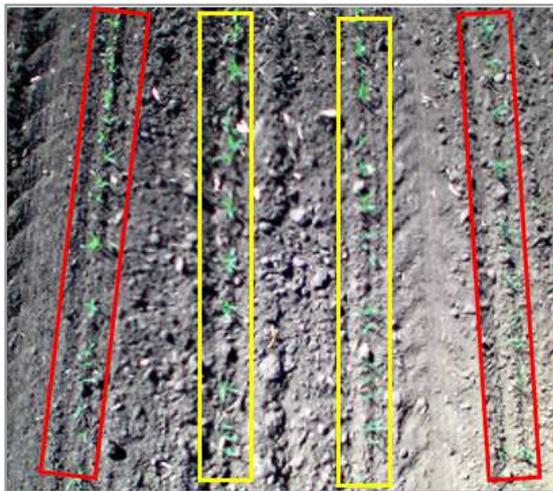


Fig. 2. Imagen con más de 2 surcos, en la que se quitan los surcos de los bordes (en rojo) y se mantienen los surcos centrales (en amarillo)



Fig. 3. Estadío V6/V7 de maíz donde ya no puede distinguirse una planta de otra en imágenes tomadas desde arriba

Un image stack es una estructura que nos va a permitir correlacionar mediante los procesos de registración digital, la totalidad de imágenes captadas para una misma parcela. Esto significa transformar y remuestrear, es decir “alinearse” cada una de las imágenes obtenidas por los procesos de sensado de acuerdo con uno o varios atributos identificatorios de los objetos (plantas en este caso) sujetos a análisis. Cada imagen del stack corresponderá a una fecha de sensado respecto de una misma parcela, y en consecuencia el stack tendrá la línea evolutiva desde su sensado inicial hasta su sensado final. La figura 4 muestra el detalle de esta estructura.

Si bien el cada image stack almacenará todas fechas sensadas, incluyendo todos los estadios, para muchas variables de estudio indicadas por los especialistas, se trabaja en consecuencia con los estadios iniciales de la evolución fenológica del maíz, de modo de garantizar la separabilidad de cada planta en el surco. Esto implica evaluar estadios entre los cuales la planta ha desarrollado su primera hasta su quinta hoja (estadios V1 a V5) como máximo. Los estadios de las plantas de maíz [14] se identifican con una letra V seguido de un número el cual indica la cantidad de hojas que ha desarrollado la planta hasta el momento.

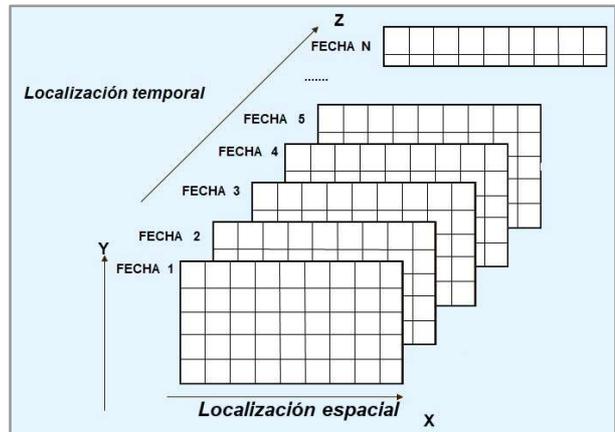


Fig. 4. Estructura de una image stack

III. DETECCIÓN DE OBJETOS DE INTERÉS (PLANTAS)

En este punto comienza el proceso de detección de características, donde se aplican técnicas de procesamiento digital que permiten la determinación de cada objeto diferente presente en la escena. Estas técnicas incluyen la eliminación de ruido, la mejora de contraste de la imagen, la binarización y la segmentación de cada planta en particular.

A. Binarización

Una vez preprocesada la imagen con las técnicas mencionadas, se procede a la binarización de la misma. En este tipo de imágenes la binarización casi nunca es “limpia”. Esto se debe a que si bien en la imagen sólo aparece el suelo en tonos amarillentos y las plantas en tonos verdosos, el suelo como tal no es generalmente compacto ni libre de malezas o rastrojos. Por lo tanto el proceso de binarizar es complejo y dependiente del estadio que se analice en la imagen. Si el estadio es inicial los plantines pueden ser fácilmente confundidos con malezas o yuyos. En consecuencia el proceso de binarización tiene en cuenta el estadio de los objetos en la imagen.

El primer paso para la binarización es la conversión a un esquema de color HSV, que debido a que la segmentación es basada en color, resulta mejor debido a que se pueden separar los tonos de la saturación de la luz. El segundo paso consiste en la binarización propiamente dicha sobre la capa H o la capa S, dependiendo del resultado de la conversión (nivel de ruido en cada una de ellas). Por último se aplican técnicas de morfología matemática binaria (básicamente erosión) para la eliminación de los artefactos presentes en la imagen que no corresponden a plantas de maíz propiamente dichas, sino a efectos de reflectancia de la superficie, rastrojos, o malezas. En este paso es donde juega un papel relevante el estadio en el que se encuentran los objetos en la escena, porque a partir del mismo se define el tamaño de los elementos estructurantes correspondientes. La siguiente figura (Fig. 5) muestra el resultado final obtenido a partir de la imagen original al aplicar este proceso



Fig. 5. Binarización. a) imagen original en estadio V1/V2 b) imagen binarizada

B. Detección de objetos por imagen

Una vez que la imagen fue binarizada y queda libre de artefactos, se procede a la identificación particular de cada uno de los objetos en la misma. En este proceso se extraen características de interés de los mismos, como es el caso del centro de masa, del área en píxeles que ocupa, etc.

La identificación de cada planta en la imagen debe estar asociada también al surco en el que se encuentra y no simplemente a una fecha. Este dato es muy importante dado que el primer algoritmo de registración que se aplica es el algoritmo de registración de las imágenes por surco. Para poder resolver esto, la imagen binarizada se divide en dos a partir del punto medio horizontal de la misma (si la imagen se trata con los surcos verticales) o del punto medio vertical (si la imagen se trata con los surcos horizontales). Así se garantiza la pertenencia de las plantas detectadas a cada surco de la imagen.



Fig. 6. Detección de plantas y sus características. En amarillo la detección realizada sobre el surco izquierdo y en rojo la detección realizada sobre el surco derecho

La figura 6 muestra una escena con dos surcos en estadios más avanzados (V3/V4), donde el resultado de la binarización se aplica como máscara a la imagen original para la determinación de cada planta en cada surco.

Los datos descriptivos de cada planta, son almacenados en un archivo de metadata que será luego asociado con el image stack correspondiente. Alguno de los atributos incluidos son la cantidad de objetos (plantas), los centros de masa de cada una de ellas, su área en píxeles y los datos del mínimo polígono que las contiene. Estos, entre otros, serán utilizados tanto en los algoritmos de registración como en los algoritmos de análisis, de aplicación posterior a la generación de cada image stack.

IV. ALGORITMOS DE REGISTRACIÓN DE IMÁGENES SECUENCIALES

En este trabajo se plantean dos tipos de algoritmos de registración multi-temporal, multi-modal y multi-vista. Uno que se encarga de la registración de surcos y otro que se encarga de la registración de plantas en el surco. La multi-temporalidad está determinada por las diferentes fechas de las imágenes a registrar. La multi-modalidad se basa en el uso de cámaras tanto de luz visible como multiespectrales. Y por último la multi-vista en el hecho de que se tienen diferentes visualizaciones de los mismos objetos por su calidad evolutiva durante el sensado de los ensayos.

A. Determinación de surcos mediante identificación de centros de masa y ajuste lineal de mínimos cuadrados

Para la generación del algoritmo de registración por surcos es necesario poder determinarlos en forma automatizada en la imagen. Tal como ha sido desarrollado en el apartado anterior, se determinan los centros de masa correspondientes a cada planta. La identificación de estos centros es relevante para poder aproximar una recta que ajuste a los mismos. La recta tiene entonces una aproximación a todas las plantas incluidas en cada surco y además nos brinda la inclinación del mismo en la imagen, producto de la perspectiva de la captura.

Para resolver este punto se utilizó un ajuste lineal por el método de los mínimos cuadrados [15], tomando como puntos de referencia a los centros de masa. El método determina los valores de los parámetros a y b de la recta que mejor se ajusta a los datos experimentales. Sea la ecuación de la recta $y = ax + b$,

$$a = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (1)$$

$$b = \frac{(\sum y_i) - a(\sum x_i)}{n} \quad (2)$$

donde n es el número de medidas y Σ representa la suma de todos los datos que se indican. Los errores en las medidas, se traducirán en errores en los resultados de a y b . La pendiente de la recta se escribirá como $a \pm \Delta a$, y la ordenada en el origen $b \pm \Delta b$. Si ε es el valor máximo de todos estos errores, las ecuaciones correspondientes son:

$$\Delta a = \frac{\sqrt{n} \varepsilon}{\sqrt{n \sum_1^n x_i^2 - (\sum_1^n x_i)^2}} \quad (3)$$

$$\Delta b = \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

La figura siguiente (Fig. 7) muestra el resultado de la binarización de la imagen original dividida en dos nuevas imágenes, cada una de ellas conteniendo el surco correspondiente. En caso caso se visualizan tanto los centros de masa como las rectas de ajuste lineal de mínimos cuadrados obtenidas de acuerdo a las ecuaciones (1), (2), (3) y (4).

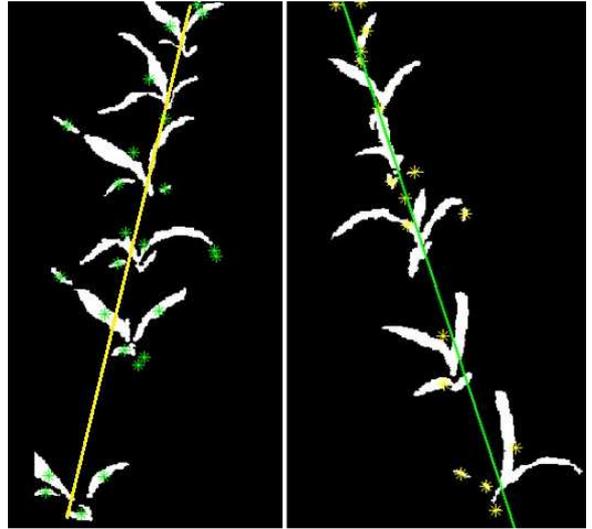


Fig. 7. Detección de centros de masa y surcos mediante ajuste lineal de cuadrados mínimos

B. Registración por surcos de toda la secuencia temporal

Para este algoritmo de registración por surcos ya se ha cumplimentado la primera etapa, detectando las características de los objetos que servirán de referencia (centros de masa y ejes o surcos). El análisis de estas características se basa en su comparación entre la imagen de referencia y las imágenes de entrada. Esta comparación permite obtener los datos necesarios para la tercera etapa en la que se definen y aplican las funciones de transformación.

La imagen de referencia será siempre la primer imagen sensada del ensayo, o sea la que contenga el maíz en su estadio más bajo. Esta decisión se basa en el hecho de que las semillas pueden emerger o no, y las plantas pueden, a pesar de haber emergido, crecer o morir, por lo que es posible en estadios superiores no contar la misma cantidad de plantas que las semillas que se sembraron. Esto se conoce como control del estado de emergencia del cultivo.

Los datos que se requieren son el ángulo de cada eje o surco en la imagen de entrada en relación al eje o surco de la imagen de referencia, y la ubicación espacial de los mismos. Estos datos se usan de parámetro para aplicar dos funciones de transformación que llamamos rígidas, como son la rotación y traslación. La rotación permite alinear cada imagen en función del surco de modo que todas queden con la misma perspectiva. La traslación es horizontal (si los surcos aparecen en la imagen en forma vertical) o vertical (si aparecen en forma horizontal). La figura 8 muestra estos cálculos con la imagen de referencia a derecha y una de las imágenes de entrada a izquierda.

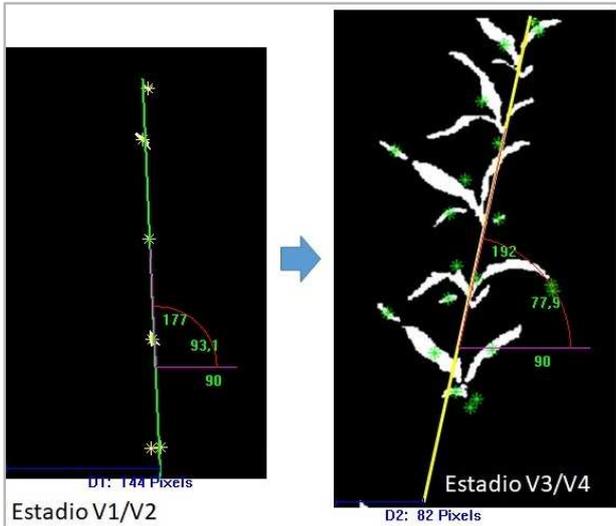


Fig. 8. Cálculo de ángulos y desplazamiento horizontal

Una vez que se han registrado todas las imágenes de la secuencia temporal de esta forma, se inicia el algoritmo de registración por plantas que se detalla en el apartado siguiente.

C. Determinación de centros de masa por planta

El resultado del primer algoritmo de registración por surcos permite obtener las imágenes alineadas sobre el eje horizontal (en este caso), tal como muestra la figura 9. En realidad las imágenes quedan superpuestas teniendo el eje o surco como referencia en ambas.

Como también puede observarse en la misma figura, hace falta otra corrección, ahora a nivel de plantas debido a que las mismas se encuentran desplazadas sobre el surco, siempre teniendo en cuenta la imagen de referencia.

En este nuevo algoritmo de registración por plantas se considera como mejor atributo o característica para determinar las transformaciones necesarias nuevamente el centro de masa de cada planta en cada imagen.

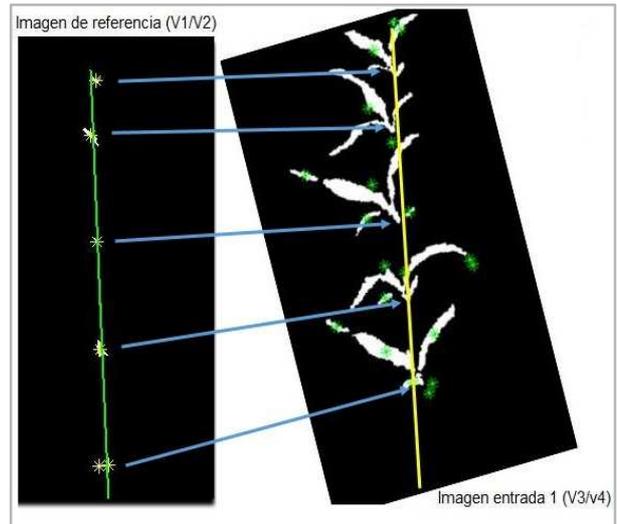


Fig. 9. Imágenes registradas por surco con desplazamiento vertical a nivel de plantas

D. Registración de plantas por surco de toda la secuencia temporal

El proceso de registración en este caso sólo valida el dato espacial referido a la coordenada horizontal (fila) o a la coordenada vertical (columna) del centro de masa de cada objeto en la imagen. Las funciones de transferencia ahora se basan en traslaciones sobre el eje correspondiente.

Siguiendo con el caso de la Figura 9 el primer problema a resolver es el desfase del punto de inicio de las plantas en el surco, siempre teniendo en cuenta en el análisis el estado de emergencia del cultivo. Puede que exista un desfase entre las primeras plantas detectadas pero que este se deba a que la planta que no se desarrolló entre un estadio fenológico y el siguiente haya sido justamente esta planta que inicia el surco. Para descartar este problema el primer paso del algoritmo es corroborar que la cantidad de objetos entre la imagen de referencia y la imagen de entrada sea la misma. Cualquiera sea el caso, entonces el algoritmo calcula las distancias a la fila o columna, según corresponda, del centro de masa de cada objeto en ambas imágenes y utiliza ese desplazamiento para registrar la imagen de entrada.

Sea FP_{IR} la fila de las coordenadas del centro de masa en una planta de la imagen de referencia, y sea FP_{IE} la fila de las coordenadas del centro de masa a la misma planta de la imagen de entrada, entonces la diferencia entre ellas,

$$\Delta (FP_{IR}, FP_{IE}) = |FP_{IR} - FP_{IE}| \quad (5)$$

Se define como el parámetro para la transformación de traslación a aplicar a la planta en la imagen de entrada. Este proceso se repite para cada planta en la imagen.

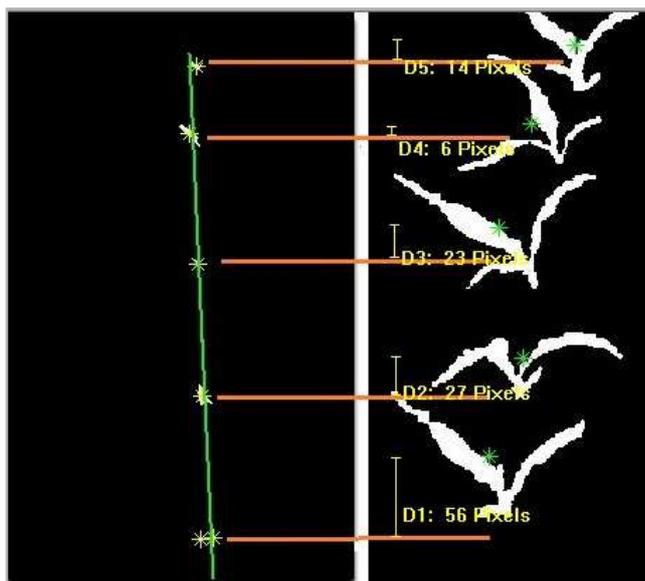


Fig. 10. Registración de plantas

La Figura 10 muestra las distancias calculadas entre las coordenadas de los centros de masa de cada planta para ambas imágenes. La siguiente tabla muestra, con coordenadas de ejemplo en filas y columnas la obtención de los cálculos de desplazamiento que se utilizan como parámetro para las transformaciones de traslación que deben aplicarse por planta en la imagen de entrada.

TABLA 1
CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTO POR PLANTA

Objeto	Centros de masa objetos Imagen de Referencia		Centros de masas objetos Imagen Entrada		$\Delta(FP_{IR}, FP_{IE})$
	Fila	Columna	Fila	Columna	
planta 1	109	132	89	319	20
planta 2	129	185	96	156	33
planta 3	145	257	113	249	31
planta 4	175	350	119	82	56
planta 5	188	434	150	26	38

En este caso coincide la cantidad de plantas también para ambas, por lo que no se aplica el cálculo de distancia entre plantas, que denominaremos *dep*. Si sucediera que alguna de ellas no se hubiese desarrollado y hubiese muerto entre un estadio sensado y el siguiente (cantidad de plantas distinta entre imágenes), entonces, tal como muestra la tabla 2, tendremos una coordenada menos (5 en la IR contra 4 en la IF)

En la tabla puede observarse en rojo el dato que se asume que no está en representación de la planta que murió durante su evolución. Luego en la tabla que sigue (debajo de la fecha) se observa la aplicación del nuevo cálculo donde efectivamente no aparece el dato de esa planta que no está en la IE.

TABLA 2
DIFERENCIA DE PLANTAS ENTRE IR E IF

Objeto	Centros de masa objetos		Centros de masas		$\Delta(FP_{IR}, FP_{IE})$
	Fila	Columna	Fila	Columna	
planta 1	109	132	89	319	20
planta 2	129	185	96	156	33
planta 3	145	257	113	249	31
planta 4	175	350	119	82	56
planta 5	188	434	150	26	38



Objeto	Centros de masa objetos Imagen de Referencia (IR)		Centros de masas objetos Imagen Entrada (IE)		$\Delta(FP_{IR}, FP_{IE})$
	Fila	Columna	Fila	Columna	
planta 1	109	132	89	319	20
planta 2	129	185	96	156	33
planta 3	145	257	113	249	31
planta 4	175	350	150	26	24
planta 5	188	434			

El problema ahora es determinar efectivamente cuál es la relación real entre las 4 componentes de la IE (imagen de entrada) y las 5 de la IF (imagen de referencia). O en otras palabras, cuál es la componente de la IR que ya no está. Para resolver esto se realizan otros cálculos basados nuevamente en la distancia entre plantas (*dep*). Se busca conocer cuál es la máxima diferencia entre las distancias entre plantas para la imagen de entrada. Entonces, sea *dmep* la *distancia máxima entre plantas*. Tenemos que:

$$D_{mep} = \text{Max} | (dep(P_{IEi+1}, IE_i)) \quad (6)$$

donde *dep* es la distancia entre plantas calculada entre las coordenadas fila de los centro de masa respectivos, y P_{IE_i} y $P_{IE_{i+1}}$ son la *i*ésima y la *i*ésima+1 plantas identificadas para la imagen de entrada. La siguiente tabla muestra estos resultados:

TABLA 3
DIFERENCIA MÁXIMA ENTRE PLANTAS

Objeto	Centros de masa objetos Imagen de Referencia (IR)		Centros de masas objetos Imagen Entrada (IE)		Distancia entre plantas IE
	Fila	Columna	Fila	Columna	
planta 1	109	132	89	319	
planta 2	129	185	96	156	7
planta 3	145	257	113	249	17
planta 4	175	350	150	26	37
planta 5	188	434			

El objeto que se relaciona con el *dmep* es entonces el objeto faltante en la IR. Una vez identificado este objeto o planta se reemplazan los datos con coordenadas $(FP_{IR,0})$ en la componente columna y se aplican los cálculos de la tabla 1. De este modo, aquellos componentes cuyo cálculo de $\Delta(FP_{IR}, FP_{IE})$ sea 0 no serán transformados por traslación porque no existen (planta 4).

TABLA 4
CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTO EN CASO DE
PLANTAS QUE YA NO ESTÁN

Objeto	Centros de masa objetos Imagen de Referencia		Centros de masas objetos Imagen Entrada		$\Delta(FP_{IR}, FP_{IE})$
	Fila	Columna	Fila	Columna	
planta 1	109	132	89	319	20
planta 2	129	185	96	156	33
planta 3	145	257	113	249	31
planta 4	175	350	175	0	0
planta 5	188	434	150	26	38

En esta tabla 4 se visualiza en rojo el resultado mencionado anteriormente. El signo negativo indica la dirección del desplazamiento sobre el eje vertical siendo positivo hacia arriba y negativo hacia abajo.

El resultado de este proceso finaliza con la registración por planta dentro de cada surco, permitiendo tal como muestra la figura 11, poder correlacionar las diferentes imágenes de las mismas en sus diferentes estadios a partir de su centro de masa.



Fig. 11. Registración espacio-temporal sobre un recorte de una planta dentro de un surco. En amarillo los centro de masa de cada imagen. En rojo la correspondencia entre imágenes de diferentes fechas del image stack, donde cada una de ellas tiene la misma dimensión en píxeles y comparten el centro de masa como centro de imagen

V. GENERACIÓN DE UN BANCO DE IMAGES STACKS POR ENSAYO

Con los dos algoritmos de registración aplicados para todas las imágenes de cada parcela de un determinado ensayo, se generan los images stacks correspondientes. Estas estructuras tendrán un tamaño de $N \times M \times Z$ píxeles, donde N refiere la cantidad de filas de cada imagen, M la cantidad de columnas y Z la cantidad de fechas incluidas en el stack. La idea fundamental del uso de este tipo de estructura radica en poder tener concentrado alrededor de un punto de referencia en particular (el centro de masa en nuestro caso), la evolución temporal de las plantas de maíz por ensayo, parcela y surco. De este modo, partiendo de la imagen inicial del stack, la que corresponderá a estadios iniciales $V1/V2$, es posible por ejemplo evaluar el crecimiento digital (área) de cada planta a medida que se avanza secuencialmente sobre el stack, entre otras cosas.

El banco de datos comprende todos los images stacks que

forman un ensayo de una campaña en particular.

VI. RESULTADOS OBTENIDOS

El presente trabajo forma parte de un conjunto de algoritmos basados en procesamiento digital de imágenes y video que permiten automatizar parte de la tarea de extracción de datos de análisis que llevan adelante los especialistas dedicados al mejoramiento genético de semillas. Como parte de este proyecto también se encuentra el desarrollo del modelo de sensado de datos a campo mediante una plataforma robótica que permita obtener los set de imágenes que usamos como entrada para este y otros desarrollos dentro del mismo proyecto.

Si bien ya se han desarrollado la mayoría de los procesos involucrados, no se cuenta aún con un set de datos totalmente normalizado como para afirmar resultados en términos absolutamente estadísticos. Los algoritmos se hacen y prueban con bancos de datos de imágenes propias sensadas a campo, con las cámaras y equipos antes mencionados. Se han utilizado dos datasets sensados en dos espacios físicos diferentes. Uno corresponde al campo experimental de la Universidad (UNNOBA) que cuenta con 4 fechas de sensado, 60 parcelas y un total de 280 imágenes de parcelas, cuya estructura se muestra en la figura 12.

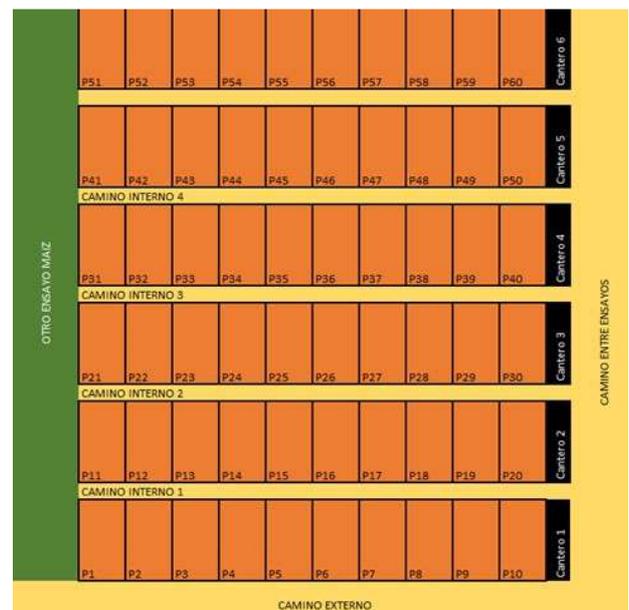


Fig. 12. Diseño ensayo Campo Experimental UNNOBA

Y otro a la Estación Experimental Inta Pergamino, a 90 km de distancia, en el que sensaron 8 fechas para diferentes variedades genéticas de maíz en diferentes estadios, con un total de 609 imágenes. Ambos en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Tampoco existen repositorios públicos de este tipo de imágenes (por surco y parcela con correspondencia espacial y temporal) que podamos utilizar.

Las pruebas realizadas sobre nuestro banco de datos han sido parciales hasta el momento y de uso específico para el diseño e implementación de las diferentes funcionales requeridas. Falta ahora armar set de datos para realizar las pruebas de validación.

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTURO

Se ha planteado una solución al problema de la caracterización fenológica de variedades genéticas de maíz utilizando imágenes digitales sensadas a campo y un conjunto de algoritmos de procesamiento digital acorde a las necesidades del caso.

La propuesta apunta a la generación automatizada de un banco de ensayos basados en estructuras images stacks que permitan tener correlacionados los datos de la evolución fenológica caracterizada por parcela, por surco y por planta en particular.

Se han presentado en este trabajo y se han desarrollado como parte del proceso de solución dos algoritmos de registración digital de imágenes de base multi-temporal, multi-modal y multi-vista, con aplicación de transformaciones rígidas de rotación y traslación. El aspecto de mayor complejidad a la hora de los desarrollos ha sido el tipo de imágenes que se deben registrar. Fundamentalmente por la característica evolutiva de los objetos (plantas de maíz) sobre la que se sostienen estos procesos de registración. Tanto el algoritmo de registración por surcos como el algoritmo de registración por planta pretenden el “solapamiento espacial” de las mismas en cada uno de sus estadios, de modo de ajustar la información correspondiente de cada una de ellas en forma correlacionada a lo largo de todo su crecimiento.

Se propone como trabajo futuro, validar estos procesos contra datasets de imágenes normalizadas. Esta normalización implica tanto el proceso de captura o el posterior proceso de preprocesamiento (tamaño, iluminación, ruido, ajuste de contraste), y procesamiento digital propiamente dicho (segmentación basada en color y binarización).

REFERENCIAS

- [1] BROWN GOTTESFELD L., “SURVEY OF IMAGE REGISTRATION TECHNIQUES”, *ACM COMPUTING SURVEYS*, 24, 4, 1992, 325-376.
- [2] BARBARA ZITOVA, JAN FLUSSER, “IMAGE REGISTRATION METHODS: A SURVEY”, *IMAGE AND VISION COMPUTING* 21(2003)977-1000.
- [3] K. SHARMA AND A. GOYAL, "CLASSIFICATION BASED SURVEY OF IMAGE REGISTRATION METHODS," *2013 FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATIONS AND NETWORKING TECHNOLOGIES (ICCCNT)*, TIRUCHENGODE, 2013, PP. 1-7.
- [4] A. SOTIRAS, C. DAVATZIKOS, AND N. PARAGIOS, “DEFORMABLE MEDICAL IMAGE REGISTRATION: A SURVEY,” *IEEE TRANS. MED. IMAGING*, VOL. 32, NO. 7, PP. 1153–1190, JUL. 2013.
- [5] M. ENGIN, H. OGUL, M. AGILDERE, AND E. SUMER, “AN EVALUATION OF IMAGE REGISTRATION METHODS FOR CHEST RADIOGRAPHS,” IN *2015 SAI INTELLIGENT SYSTEMS CONFERENCE (INTELLISYS)*, 2015, PP. 822–827.
- [6] R. BERENGUER ET AL., “THE INFLUENCE OF THE IMAGE REGISTRATION METHOD ON THE ADAPTIVE RADIOTHERAPY. A PROOF OF THE PRINCIPLE IN A SELECTED CASE OF PROSTATE IMRT,” *PHYS. MEDICA*, VOL. 45, PP. 93–98, JAN. 2018.
- [7] V. TAVAKOLI AND A. A. AMINI, “A SURVEY OF SHAPED-BASED REGISTRATION AND SEGMENTATION TECHNIQUES FOR CARDIAC IMAGES,” *COMPUT. VIS. IMAGE UNDERST.*, VOL. 117, NO. 9, PP. 966–989, SEP. 2013.
- [8] M. S. JAVADI, Z. KADIM, H. H. WOON, K. M. JOHARI, AND N. SAMUDIN, “AN AUTOMATIC ROBUST IMAGE REGISTRATION ALGORITHM FOR AERIAL MAPPING,” *INT. J. IMAGE GRAPH.*, VOL. 15, NO. 2, P. 1540002, APR. 2015.
- [9] V. LAKSHMANAN AND R. GOMATHI, “A SURVEY ON IMAGE COMPLETION TECHNIQUES IN REMOTE SENSING IMAGES,” IN *2017 FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING, COMMUNICATION AND NETWORKING (ICSCN)*, 2017, PP. 1–6.
- [10] J. LE MOIGNE, “INTRODUCTION TO REMOTE SENSING IMAGE REGISTRATION,” IN *2017 IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS)*, 2017, PP. 2565–2568.
- [11] M. S. JAVADI, Z. KADIM, H. H. WOON, K. M. JOHARI, AND N. SAMUDIN, “AN AUTOMATIC ROBUST IMAGE REGISTRATION ALGORITHM FOR AERIAL MAPPING,” *INT. J. IMAGE GRAPH.*, VOL. 15, NO. 2, P. 1540002, APR. 2015.
- [12] L. TANG, Y. LI, T. LING, L. HE, T. LUO, AND D. GUO, “UAV IMAGE REGISTRATION ALGORITHM BASED ON OVERLAPPING REGION DETECTION,” IN *2016 IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS)*, 2016, PP. 6706–6709.
- [13] X. LE AND R. GONZALEZ, “A CONSISTENT, REAL-TIME IMAGE SEGMENTATION FOR OBJECT TRACKING,” IN *2016 INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL IMAGE COMPUTING: TECHNIQUES AND APPLICATIONS (DICTA)*, 2016, PP. 1–7.
- [14] S. W. RITCHIE, J. J. HANWAY, AND G. O. BENSON, “HOW A CORN PLANT DEVELOPS,” *SPEC. REP.*, VOL. 48, P. 24, 1986.
- [15] H. ABDI, “THE METHOD OF LEAST SQUARES,” *ENCYCLOPEDIA OF MEASUREMENT AND STATISTICS*. THOUSAND OAKS (CA): SAGE, P. 7, 2007.