

Integración del Procesamiento Imágenes e Internet de las Cosas en la estimación temprana del rendimiento de cultivos frutales

Gustavo A. Dejean¹, Federico Balaguer², Alejandra Yommi³, Jorge H. Doorn¹,
María A. David³, Natalia L. Murillo⁴, Ignacio A. García Ravlic¹, Dante H. Mendoza¹

¹Escuela de Informática, Universidad Nacional del Oeste

²Stream S.A., ³INTA, Estación Experimental Balcarce

⁴INTA, Agencia de Extensión Rural Otamendi

dejean2010@uno.edu.ar, federico.balaguer@gmail.com, yommi.alejandra@inta.gob.ar, jdoorn@uno.edu.ar,
{david.maria, murillo.natalia}@inta.gob.ar, gnachoxp@gmail.com, hmendoza@uno.edu.ar

RESUMEN

La actividad frutícola necesita un conjunto de actividades para lograr altos niveles de eficiencia y productividad. Una de esas actividades claves consiste en estimar lo más exactamente posible la producción total, ya que la misma condiciona los aspectos logísticos que deben ser atendidos en el breve lapso en el que transcurre la recolección de frutos. La producción depende esencialmente de dos factores, la cantidad de frutos por unidad de superficie y el tamaño de los frutos. Predecir el tamaño de los frutos requiere realizar un seguimiento continuo de los aspectos climáticos, tanto los de la región, cómo el microclima de la plantación. Por su parte se aspira a estimar la cantidad de frutos en base al procesamiento de imágenes de estados tempranos del cultivo, tales como botones florales, flores o frutos inmaduros. El caso de estudio es público-privado interinstitucional e interdisciplinario y se aboca a predecir la producción de kiwi en una plantación de Miramar, cuyo productor pertenece a la Cámara de Productores de Kiwi y tiene relación desde hace años con INTA Balcarce.

Palabras clave: Procesamiento de Imágenes, Reconocimiento de objetos, Telemedición, Internet de las cosas.

CONTEXTO

La línea de investigación que se presenta es parte del proyecto de investigación

“Estimación temprana de rendimiento del cultivo de kiwi mediante el procesamiento de imágenes” que se desarrolla en forma conjunta por la Universidad Nacional del Oeste, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y la empresa Stream S.A. Cada una de estas entidades aborda los aspectos relacionados con su área de especialización.

1. INTRODUCCIÓN

Lograr, en la producción frutícola, un nivel de eficiencia que permita alcanzar resultados económicamente sustentables, requiere la realización de un conjunto de actividades, tales como la poda, atado, riego, fertilización, control de heladas y de plagas, polinización, raleo y cosecha, con alto grado de planificación. Durante la cosecha, se necesita una adecuada gestión del conjunto de recursos que dependen fuertemente de la producción. Es así que, poder estimar tempranamente la producción permite una planificación adecuada. Actualmente, se estima el volumen de cosecha contando los frutos por unidad de superficie en una etapa avanzada de desarrollo de los mismos. Sin embargo, esta estimación tardía es demasiado cercana a la cosecha y muy difícil en plantaciones de medianas a grandes. En ese sentido, una estimación temprana del rendimiento permitiría tomar decisiones operativas y estratégicas. Desde el punto de vista operativo, podría orientar en cuál será la necesidad de recursos permitiendo un uso más racional de los mismos y desde el punto de vista estratégico, posibilitaría

anticipar la negociación de la producción en el mercado externo, además de cuantificar tempranamente el espacio necesario de cámaras de frío para almacenar la fruta destinada a la venta en el mercado interno, así como el material de empaque necesario.

La estimación temprana requiere monitorear la evolución fenológica de la planta, acompañada por información de las condiciones climáticas. El análisis de las condiciones climáticas comienza, inclusive, en la etapa invernal cuando la planta aparentemente no tiene actividad, pero la acumulación de bajas temperaturas es fundamental para romper la dormición de las yemas (muchas de las cuales dan lugar a flores y frutos). También se deben considerar otros factores climáticos que afectan diferentes momentos del proceso productivo: heladas durante la brotación, bajas temperaturas y lluvias durante la polinización, estrés térmico durante el crecimiento de los frutos, condiciones de temperatura y humedad relativa ambiente, que predisponen el desarrollo de enfermedades y plagas, entre otros. El monitoreo de la fenología del cultivo incluye identificar temporalmente la ocurrencia de los distintos estados según escalas internacionalmente reconocidas y luego asociarlos a variables climáticas. La identificación, conteo y seguimiento de las yemas, botones florales o frutos pequeños podría ser utilizado como insumo para la estimación temprana de rendimiento. Se estima que es posible lograrlo con herramientas y tecnologías de cómputo que lleven a cabo la manipulación asistida de imágenes. En resumen, este proyecto aborda un problema que no puede ser resuelto sin el conocimiento y la interacción entre profesionales de diferentes disciplinas: Fruticultura, Fisiología Vegetal, Informática, Procesamiento digital de la información.

2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

El kiwi es una planta perenne introducida en Argentina a fines de los años '80. El área plantada muestra un crecimiento muy marcado y sostenido a partir del año 2003, sumando en la actualidad aproximadamente 1000 has. en

todo el país. Alrededor de la mitad de la superficie se encuentra en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. El kiwi es una planta caduca, es decir, que tiene reposo invernal. El número de frutos obtenido por planta varía con el número de yemas, el porcentaje de brotación de las yemas, el porcentaje de brotes reproductivos y el número de inflorescencias por brote reproductivo. El éxito de una plantación de kiwi depende en gran medida de la cantidad de frutos cosechados por hectárea y de la proporción obtenida de frutos medianos a grandes, debido a que estos tamaños suelen tener precios diferenciales, mejorando el retorno económico [Testolin 1992].

Las prácticas agronómicas permiten lograr un determinado número de yemas por hectárea. Cangi y Atalay comprobaron que el peso promedio del fruto de kiwi 'Hayward', de alrededor de 120 g, no varía con 180 a 300 yemas por planta, pero la cantidad de frutos se duplica con la densidad más alta, por lo tanto, también el rendimiento [Cangi 2006]. En Italia, 150.000 a 200.000 yemas/ha (15 a 20 yemas/m²) es la densidad óptima para una carga frutal de kiwi tal que maximiza la cantidad de frutos sin afectar el tamaño y la calidad del fruto, aunque estos valores pueden variar con las condiciones agroclimáticas. En el norte y centro de Italia, un aumento en la densidad reduce la brotación de yemas reproductivas y la calidad del fruto mientras que, en el sur, resulta beneficioso contar con plantaciones de hasta 250.000 yemas/ha [Testolin 2009].

La variedad 'Hayward' requiere entre 700 y 850 horas de frío, por debajo de 7 °C, acumuladas en la etapa invernal para la brotación de las yemas. Además del componente genético, las variables climatológicas, tales como la temperatura media, máxima, mínima, acumulación de horas de frío y heliofanía entre otras condicionan la proporción de yemas reproductivas y el número de flores por yema [Grant 1984] [Warrington 1986] [Snelgar 1988] [Snelgar 1992] [Austin 2002].

Debido a la alta frecuencia de fuertes vientos y a la caída ocasional de granizo en la provincia

de Buenos Aires, el uso de mallas antigranizo y de cortinas, tanto artificiales como forestales, es una práctica recomendada y muy utilizada en las plantaciones de kiwi [David 2020].

Se ha probado que, el uso de techos con mallas monofilamento en producciones frutícolas reduce la velocidad del viento, y dependiendo de la densidad y color de la malla, pueden interceptar de radiación fotosintéticamente activa y la temperatura del aire, creando un microclima [Dussi 2005] [Bosco 2018].

En plantaciones de kiwi se ha reportado que las mallas antigranizo, en función al color, pueden afectar el rendimiento y la calidad de los frutos [Basile 2012]. Se desconoce si las mallas antigranizo que se utilizan en la zona productiva del sudeste de la provincia de Buenos Aires crean un microclima y si así fuera, si el mismo es predecible utilizando la información de los registros de las centrales meteorológicas cercanas.

Sin duda, una estimación temprana sería una herramienta esencial para adecuar el suministro de insumos apuntando a una producción más sustentable, sin resignar cantidad y calidad de la fruta obtenida en cada temporada. Posibilita dimensionar las toneladas a cosechar y negociar con anticipación las ventas en diferentes canales de comercialización. Zhou y Wulfsohn mencionaron que una predicción temprana y precisa del rendimiento tendría grandes beneficios para la fruticultura de precisión [Zhou 2012] [Wulfshohn 2012]. Los productores tendrían un mayor control de la producción, gastos, y podrían adecuar la capacidad de almacenamiento. A su vez, se podrían diferenciar áreas de la plantación con diferente productividad, lo cual conlleva a manejar los recursos adecuadamente para cada situación, diseñando un manejo específico de cada área del lote. La cuantificación temprana podría realizarse por recuento de diferentes órganos vegetativos y reproductivos mediante la interpretación de imágenes.

Algunos avances en este sentido se encuentran publicados. Ciertos reportes internacionales refieren a la estimación de rendimiento de diferentes frutales a partir de imágenes tomadas a los frutos en estados tempranos de

desarrollo [Dunn 2004] [Zhou 2012], encontrando una aceptable correlación con el rendimiento obtenido. La estimación del rendimiento a partir del número de flores ha dado aceptables resultados en manzanos [Aggelopoulou 2010] y poca correlación en almendros [Underwood 2016]. En manzanas, se ha avanzado en modelos de estimación del rendimiento por medio de la digitalización de imágenes [Stajanko 2011]. Recientemente en kiwi, Fu et al. desarrollaron un modelo para detectar los frutos con imágenes, pero en un estado de desarrollo avanzado de los mismos [Fu 208].

Probablemente, el estado de yema brotada en kiwi sea uno de los más apropiados para hacer una predicción temprana mediante la interpretación de imágenes, ya que en estados subsiguientes hay mayor desarrollo del follaje y buena parte de los órganos podrían quedar escondidos entre las hojas.

La cuantificación por imágenes del número de botones florales y de frutos en estados tempranos de desarrollo probablemente mejore la precisión de la estimación del rendimiento, pero implica un número muchísimo mayor de órganos a contar por unidad de superficie respecto a las yemas, y el uso de técnicas para mejorar la capacidad de captura debido al ocultamiento y solapamiento de los mismos. Otro aspecto relevante, asociado con el procesamiento de imágenes, está relacionado con el tipo de cámara a ser utilizada y la iluminación necesaria. Se desconoce si existen diferencias importantes entre las imágenes tomadas con cámaras infrarrojas, de luz visible o luz ultravioleta. También interesa determinar si es útil o necesario utilizar una fuente de iluminación artificial o es suficiente con la radiación natural.

En lo que se refiere al tamaño de los frutos, la estimación del mismo a partir de la información climatológica es una actividad que requiere mayores plazos que los del presente proyecto, por lo que esta parte del proyecto está centrada en determinar las características del microclima en la plantación y comprobar el grado de predictibilidad del mismo a partir de datos de estaciones meteorológicas de la región, así como analizar

las posibilidades de mejorar el mismo en el contexto de los recursos disponibles.

3. RESULTADOS OBTENIDOS/ESPERADOS

Se seleccionarán al azar 50 plantas femeninas, cada una de ellas será georreferenciada y etiquetada. En cada planta a muestrear se colocará un marco de 2,5 m x 1 m de caño plástico pintado con un color contrastante al verde, atándolos en sus cuatro extremos a la planta para delimitar el área de estudio. El lado menor del rectángulo se apoyará sobre los brazos o branquetas de la planta sobre la línea de plantación y el lado mayor, irá en el sentido del largo de los cargadores, llegando aproximadamente a la mitad de la entrefila.

El recuento se realizará durante la primavera 2021 y 2022 en tres estados fenológicos: yema brotada a mediados de septiembre, botón floral a mediados de octubre y frutos en estados tempranos de desarrollo de principio a mediados de diciembre, respectivamente [Salinero 2009] [David 2018]. En caso de ocultamientos se repetirán las imágenes y el conteo se estimará mediante alguna de las técnicas de captura y recaptura, basadas en los modelos de Otis [Otis 1978], para lo cual habrá que evaluar la capacidad de captura de cada imagen respecto de las demás [Briand 2000].

Se instalarán cinco sensores en ubicaciones al azar debajo de la malla antigranizo, cerca de la periferia y en el interior del lote. Se tomarán datos de temperatura del aire, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa cada hora. También se colocarán dos sensores para contar con información climática por encima de la malla antigranizo. Dependiendo de la conectividad disponible, se utilizarán sensores IoT (Internet de las Cosas) o cajas de adquisición (datalogger).

Se calcularán las horas de frío acumuladas durante el reposo invernal, se registrará la ocurrencia de heladas, se evaluarán las condiciones de temperatura durante la polinización, durante el crecimiento y desarrollo del fruto, así como también se registrará el momento y volumen de las precipitaciones. Se evaluará la diferencia entre los datos obtenidos en condiciones protegidas

y a cielo abierto, e incluso se considerarán datos de estaciones meteorológicas cercanas. Se analizará la existencia o no de un microclima en la plantación y se calcularán las regresiones para cada variable climática medida y calculada en las diferentes condiciones.

Con los datos obtenidos a partir del procesamiento de las imágenes y la cuantificación manual del primer año, se definirán modelos para estimar el número de frutos a cosechar.

Todos los frutos de cada uno de los marcos colocados en las plantas en estudio se recolectarán manualmente en mayo del 2022, aunque se planifica realizar un conteo adicional en mayo del 2023 en el marco de un nuevo proyecto. Debido al ciclo del cultivo, el período del proyecto permitirá contar con un segundo año de datos de los dos primeros estados fenológicos. Una extensión del proyecto permitiría obtener la cuantificación del número de frutos mediante imágenes y por conteo manual en diciembre del año 2022, con la verificación del número de frutos realmente cosechados en mayo del siguiente año, contando de esa manera con datos de dos años lo que permitiría una mejor verificación del modelo de predicción propuesto.

Se comparará el número de frutos estimado mediante los modelos predictivos a partir del procesamiento de imágenes y por conteo manual, respecto al número de frutos cosechados. En caso de que el grado de precisión de la estimación por algunos de los métodos probados no fuera el deseado, se establecerá cual es la información más precisa, se replicarán también los conteos manuales y se estudiarán las respectivas dispersiones. Eventualmente, se desarrollarán herramientas que complementen los mismos, de ser necesarios. De esta forma, se estimará el rendimiento en términos de número de frutos/ha en función a la cuantificación temprana de órganos vegetales.

Si bien esta estimación será válida para las condiciones climáticas y de manejo de ese primer año, o de dos años en caso de poder contar con una extensión del proyecto, el modelo se irá validando y ajustando en

sucesivos años para mejorar la predicción.

4. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

En el proyecto participan seis investigadores, y dos alumnos de grado, ambos con una beca de investigación.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [Aggelopoulou 2010] Aggelopoulou, K. D., Wulfsohn, D., Fountas, S., Gemtos, T. A., Nanos, G. D. and Blackmore, S. 2010. Spatial variability of yield and quality in a small apple orchard. *Precision Agric.* 11:538–556. DOI: 10.1007/s11119-009-9146-9.
- [Austin 2002] Austin, P. T., Hall, A. J., Snelgar, W. P. and Currie, M. J. 2002. Modelling kiwifruit budbreak as a function of temperature and bud interactions. *Ann. Bot.* 89(6):695–706. DOI: 10.1093/aob/mcf113.
- [Basile 2012] Basile, B., Giaccone, M., Cirillo, C., Ritieni, A., Graziani, G., Shahak, Y. and Forlani, M. 2012. Photo-selective hail nets affect fruit size and quality in Hayward kiwifruit. *Scientia Hort.* 141:91–97. DOI:10.1016/j.scienta.2012.04.022.
- [Bosco 2018] Bosco, L. C., Bergamaschi, H., Cardoso, L. S., Paula, V., Marodin, G.A.B. and Brauner, P.C. 2018. Microclimate alterations caused by agricultural hail net coverage and effects on apple tree yield in subtropical climate of Southern Brazil. *Bragantia* 77(1):181–192. DOI: 10.1590/1678-4499.2016459.
- [Briand 2000] Briand, L., El Emam, K., Freimut, B., and Laitenberger, O. 2000. A Comprehensive Evaluation of Capture-Recapture Models for Estimating software Defects Contents. *IEEE Trans. Software Eng.* 26(6):518–540. DOI: 10.1109/32.852741.
- [Cangi 2006] Cangi, R. and Atalay, D.A. 2006. Effects of different bud loading levels on the yield, leaf and fruit characteristics of Hayward kiwifruit. *Hort. Sci.* 33:23–28. DOI: 10.17221/3736-HORTSCI
- [David 2018] David, M.A., Yommi, A., Sánchez, E. 2018. Fenología del cultivo de kiwi en el sudeste de Buenos Aires. <https://inta.gov.ar/documentos/fenologia-del-cultivo-de-kiwi-en-el-sudeste-de-buenos-aires>.
- [David 2020] David, M.A., Yommi, A., Sanchez, E. 2020. Elección del terreno y plantación del cultivo de kiwi. 1a ed. Balcarce, Buenos Aires: Ediciones INTA. Libro digital, 39 p.
- [Dunn 2004] Dunn, G.M., and Martin, S. R. 2004. Yield prediction from digital image analysis: A technique with potential for vineyard assessments prior to harvest. *Australian J. Grape and Wine Res.* 10:196–198. DOI: 10.1111/j.1755-0238.2004.tb00022.x.
- [Dussi 2005] Dussi, M., Giardina, G., Sosa, D., González Junyent, R., Zecca, A. and Reeb, P. 205. Shade nets effect on canopy light distribution an quality of fruit and spur leaf on apple cv. Fuji. *Spanish Journal of Agricultural Research* 3(2):253–260. DOI: 10.5424/sjar/2005032-144
- [Fu 2018] Fu, L., Feng, Y., Elkamil, T., Liu, Z., Li, R. and Cui, Y. 2018. Image recognition method of multi-cluster kiwifruit in field based on convolutional neural networks. *Trans. Chinese Soc. Agric. Eng.* 34(2):205–211. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.02.028.
- [Grant 1984] Grant, J.A. and Ryugo, K. 1984. Influence of within-canopy shading on fruit size, shoot growth, and return bloom in kiwifruit. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 109: 799–802.
- [Otis 1978] Otis, D.L., Burnham, K.P. White, G.C., and Anderson, D.R. 1978. *Statistical inference from Capture on Closed Animal Populations.* Wildlife Monograph 62.
- [Salinero 2009] Salinero, M. C., Vela, P. and Sainz, M. J. 2009. Phenological growth stages of kiwifruit (*Actinidia deliciosa* 'Hayward'). *Scientia Hort.* 121(1):27–31. DOI: 10.1016/j.scienta.2009.01.013.
- [Snelgar 1988] Snelgar, W.P., Bayley, G. and Manson, P.J. 1988. Temperature studies on kiwifruit vines using relocatable greenhouses. *New Zealand J. Exp. Agric. Res.* 16: 329–339.
- [Snelgar 1992] Snelgar, W.P., Manson, P.J., and Martin, P.J. 1992. Influence of time of shading on flowering and yield of kiwifruit vines. *J. Hortic. Sci.* 67: 481–487.
- [Stajanko 2011] Stajanko, D., and Blanke, M. M. 2011. Yield prediction in fruit crops using image analysis. *Acta Hort.* 903:1115–1119. DOI: 10.17660/ActaHortic.2011.903.155.
- [Testolin 1992] Testolin, R., and Costa, G. 1992. Modelling a kiwifruit orchard. *Acta Hort.* 313:99–103.
- [Testolin 2009] Testolin, R. and Ferguson, A. 2009. Kiwifruit (*Actinidia* spp.) production and marketing in Italy. *NZ J. Crop Hort. Sci.* 37(1):1–32. DOI: 10.1080/01140670909510246.
- [Underwood 2016] Underwood, J. P., Whelan, B., Hung, C. and Sukkarieh, S. 2016. Mapping almond orchard canopy volume, flowers, fruit and yield using lidar and vision sensors. *Computers and Electronics in Agric.* 130:83–96. DOI: 10.1016/j.compag.2016.09.014.
- [Warrington 1986] Warrington, I.J. and Stanley C.J. 1986. The influence of pre- and post-budbreak temperatures on flowering in kiwifruit. *Acta Hort.* 175:103–107.
- [Wulfshohn 2012] Wulfsohn, D., F.A. Zamora, C. Potin Tellez, I. Zamora Lagos and M. García-Fiñana. 2012. Multilevel systematic sampling to estimate total fruit number for yield forecasts. *Precision Agric.* 13:256–275. DOI: 10.1007/s11119-011-9245-2.
- [Zhou 2012] Zhou, R., Damerow, L., Sun, Y. and Blanke, M.M. 2012. Using colour features of cv. 'Gala' apple fruits in an orchard in image processing to predict yield. *Precision Agric.* 13:568–580. DOI: 10.1007/s11119-012-9269-2.