INNOVACIÓN TECNOLÓGICA APLICADA A LA SV DEL CULTIVO

Aplicación de precisión contra la mosca del olivo basada en UAV

Manuel Pérez-Ruiz y Jorge Martínez Guanter (Grupo de Investigación AGR-278; Smart Biosystems Laboratory (SBL). Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos. Área de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Sevilla. manuelperez@us.es).

En los últimos años, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) han demostrado su capacidad para ayudar al sector agrícola en tareas como conocer el estado nutricional del cultivo, detectar plagas y enfermedades de forma temprana o incluso programar riegos de precisión mediante imágenes térmicas. Este artículo describe el prototipo de pulverizador para drones ATHOS (Aerial Treatment for High Orchard Spraying), desarrollado por técnicos de DRONSAP y de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Sevilla y diseñado íntegramente para tratamientos a ultra-bajo volumen. Este tipo de labores pueden suponer ahorros considerables en insumos, generando aplicaciones eficientes y pudiendo contribuir a evitar riesgos como la exposición de los operarios a los pesticidas durante los tratamientos.

INTRODUCCIÓN

La prevención en la aparición de insectos y otros vectores de enfermedades juega un papel crucial en el manejo de plagas actual. Si bien existe una amplia preocupación por las consecuencias ambientales negativas que pueden derivar de la aplicación de pesticidas, herbicidas y otros fitosanitarios en forma líquida, la pulverización sigue siendo la forma más común para su aplicación debido a su bajo coste y su eficiencia. Los implementos y tecnologías utilizados para este tipo de aplicaciones han permanecido relativamente sin cambios significativos durante los últimos años. Esto ha dejado margen para investigar en mejoras en la pulverización de precisión, buscando un cambio en la forma en que se aplican estos productos fitosanitarios. De este modo, pese a que el uso de los pulverizadores hidráulicos e hidroneumáticos como implementos junto al tractor agrícola está indiscutiblemente implantado en aplicaciones convencionales de herbicidas, pesticidas y plaguicidas, la tecnología dron en los últimos años ha demostrado su utilidad en agricultura y control de vectores, no sólo para la observación y detección, sino también para el manejo de cargas útiles, incluida la aplicación de agroquímicos. Las tareas de aplicación de estos inputs mediante drones presentan un reto técnico considerable, en el que el comportamiento de la carga de pago resulta muy diferente y la demanda de potencia es significativamente mayor si se comparan con las habituales tareas de captación de información mediante sensores o cámaras. En este tipo de aplicaciones, los drones del tipo multi-rotor presentan una serie de ventajas frente a los de ala fija o las avionetas utilizadas en los tratamientos aéreos, como son su flexibilidad y maniobrabilidad en patrones de vuelo complejos, la no necesidad de contar con una amplia zona para el aterrizaje/despegue y la posibilidad de realizar vuelos estacionarios sobre puntos determinados del terreno.

Basándonos en estas premisas se ha desarrollado el presente trabajo con el objetivo de desarrollar un sistema de pulverización modular de bajo coste, capaz de ser adaptado a una plataforma aérea comercial y de realizar aplicaciones de ultra-bajo volumen. Además, se ha realizado un análisis comparativo de los costes económicos de realizar una aplicación con esta plataforma frente a una aplicación convencional con atomizador, poniendo como ejemplo el tratamiento con un producto fitosanitario comercial que actúa como cebo para la mosca del olivo (*Bactrocera oleae*).

Plataforma de vuelo

Para albergar el sistema capaz de aplicar el tratamiento fitosanitario ensayado se evaluaron en una fase inicial diferentes plataformas en base a los criterios de autonomía, capacidad de carga, etc., seleccionando de entre ellas el modelo de dron comercial DJI s1000+ (DJI, Shenzhen, China). Este modelo de octocóptero permite el despegue/aterrizaje vertical (*Vertical Take-Off and Landing o VTOL*) y tiene una masa en vacío cercana a los 6 kg. Este UAV está equipado con ocho motores eléctricos *brushless* alimentados por una batería de 20 amperios de intensidad, y puede realizar vuelos siendo pilotado de forma remota mediante una emisora de radiofrecuencia, o bien de forma autónoma, combinando su georreferenciación mediante su receptor GNSS (Global Navigation Satellite System) y su sistema de navegación y generación de rutas en base a puntos de paso predefinidos o *waypoints*. La carga de pago máxima que permite incorporar el equipo es de 5 kg, no siendo posible superar en cualquier caso los 11 kg de masa total al despegue. La autonomía del equipo montando el sistema aplicador que se describe a continuación ha sido medida en varios vuelos con la carga máxima, estableciéndose una autonomía media de vuelo de catorce minutos.

Figura 1. (a) Sistema pulverizador desarrollado. (b) Equipo ATHOS de aplicación montado a bordo del dron.

Figura 2. (Izquierda) Zona de ensayo en olivar intensivo. (Derecha) Aplicación a ultra-bajo volumen utilizando el sistema ATHOS con una única boquilla.

Sistema aplicador ATHOS

Se diseñó y construyó un sistema de aplicación para ser montado en la plataforma aérea seleccionada, atendiendo a las limitaciones en la carga de pago y con el objetivo de utilizar materiales de bajo coste (Figura 1).

Cinco elementos constituyen el conjunto aplicador: la estructura de soporte, el depósito para alojar el producto fitosanitario, el brazo o barra porta boquillas, el conjunto de conducciones y bomba que forman el sistema hidráulico y el sistema de control eléctrico de pulverización. El depósito, situado en la parte inferior del dron, cuenta con una capacidad de 4 L; la barra porta boquillas se diseñó a partir de un perfil de aluminio, permitiendo montar cuatro boquillas con una separación de 25 cm entre ellas. Tanto la estructura de montaje y acoplamiento con el dron, como el resto de piezas del armazón, fueron diseñadas y fabricadas mediante impresión 3D. También se diseñó un pequeño brazo para montar una única boquilla central para realizar micro-aplicaciones. Para las conducciones se seleccionaron tubos de PVC transparente de 0.6 mm de diámetro interior, mientras que una pequeña bomba eléctrica alimentada de forma independiente con una tensión de 12V era la encargada de la impulsión en el circuito alcanzando una presión de funcionamiento máxima de 2.5 bar. El sistema de control de pulverización permite accionar la bomba y variar su régimen giro de forma remota desde la emisora de control del dron, además de posibilitar la aplicación autónoma en zonas específicas mediante coordenadas preestablecidas gracias a la interconexión con el sistema electrónico y el equipo GNSS. Se llevaron a cabo ensayos de laboratorio para determinar el caudal medio de cada boquilla cuando se establecía el máximo régimen de giro de la bomba recogiendo la cantidad de agua en probetas independientes.

Ensayos de campo

Para validar el correcto funcionamiento de la tecnología desarrollada, se estableció como escenario de ensayos una parcela de olivar intensivo (marco de plantación de 5x7 m). En ella se realizaron vuelos con diferentes rutas pre-programadas (en línea recta, vuelos siguiendo un patrón rectangular, etc.), diferentes patrones de aplicación y velocidades de avance distintas, ensayándose tratamientos a 2, 3 y 4 m/s de velocidad de avance horizontal a una altura de 1 metro sobre las copas de los árboles (Figura 2). El producto fitosanitario comercial elegido para estos primeros ensayos de aplicación sobre olivar fue el Spintor 480SC, que actúa como cebo para la mosca del olivo (*Bactrocera oleae*), de la firma

DOW AgroSciences. Para este insecticida, cuya materia activa y composición es Spinosad al 0.024%, se recomienda una dosis de aplicación de entre 0.25-0.5 l/ha para ser aplicado en bandas cubriendo un 25% de la superficie total, y siendo diluido en una proporción de 1:10, lo que permite que con un depósito del sistema pulverizador desarrollado ATHOS se realice un tratamiento para una hectárea. Consideramos relevante señalar que en estos primeros ensayos no se tenía como objetivo el evaluar la calidad de la aplicación, sino que constituían una primera prueba de la integración de los componentes en el sistema de vuelo y del correcto funcionamiento de éste.

Valoración económica

Teniendo en cuenta parámetros como la cantidad de producto aplicado, el rendimiento horario del equipo de pulverización, el coste y periodo de amortización de los equipos, etc., se ha realizado el estudio comparativo respecto al mismo tipo de tarea si se emplea la plataforma aérea o un equipo convencional de aplicación. Respecto a la evaluación económica de la aplicación utilizando equipos convencionales de aplicación localizada de cebo para mosca, los cálculos se han basado en las consideraciones técnicas propuestas por ASABE y el MAGRAMA. En ellas se analizan los costes de operaciones agrícolas recogiendo: i) los costes fijos de amortización, intereses, alojamiento de la maquinaria, seguros e impuestos; ii) los costes variables, que incluyen combustibles, lubricantes, desgaste de los neumáticos, costes globales de reparaciones y mantenimiento, y mano de obra del tractorista; y iii) el coste total horario de la operación, sumando el del tractor y el del implemento. Para la evaluación económica de la aplicación, se estableció un escenario teórico de trabajo sobre una parcela de olivar intensivo similar a la descrita en la Sección 2.3, con un marco de plantación de 5 x 7 m, con un número de árboles por hectárea de unos 285 aproximadamente. En ella, se plantea un tratamiento a ultra-bajo volumen, en el que ambos equipos (tanto el conjunto del tractor-implemento como el dron) deben recorrer el 50% de la superficie (Figura 3).

Para el cálculo de los costes de aplicación, el estudio económico comparativo se realiza sobre la base de un tractor con las características recogidas en la Tabla 1 y el sistema ATHOS descrito anteriormente.

Tabla 1. Características del tractor empleado en la valoración económica.

Potencia Nominal	78 kW
Potencia máx. TDF	70 kW
Valor de Adquisición	30000 €
Horas de Utilización Anual	1000 h/año
Periodo de Vida Útil	12 años
Horas de actividad durante vida útil	12000 h

A partir de los resultados preliminares de los ensayos de campo y conociendo los costes de diseño y desarrollo, se realiza la valoración económica del equipo ATHOS basada en datos empíricos y realizando la comparación con el análisis anterior, ya que todavía no se han encontrado estudios ni bibliografía relevantes al respecto.

Resultados preliminares

En este apartado se presentan los resultados obtenidos con respecto al desarrollo del sistema aplicador y a la evaluación económica comparativa de los costes llevada a cabo entre el sistema ATHOS y una aplicación convencional (pulverizador hidroneumático).

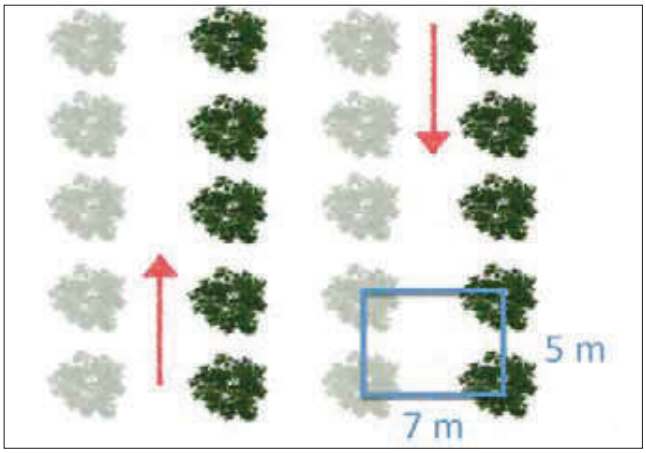

Figura 3. Patrón de aplicación en el marco de trabajo propuesto y marco de plantación de olivar intensivo.

Desarrollo del sistema aplicador ATHOS. Una vez se integraron los componentes del sistema aplicador, la mayor complejidad en el desarrollo de la plataforma era la necesidad de conseguir un vuelo estable y nivelado. Para ello se debieron realizar una serie de ajustes respecto a la situación del centro de gravedad y la compensación del peso, teniendo en cuenta factores como el posible "oleaje" del líquido dentro del depósito durante el vuelo y la disminución progresiva del peso del conjunto a medida que se realiza la operación. Se observó que el primero de estos factores limita la velocidad de avance máxima y la maniobrabilidad del conjunto, mientras que el segundo afecta a la curva de descarga de la batería y a la potencia desarrollada por los motores. Para evitar ambos, se calcularon las variaciones del centro de gravedad del sistema durante el vuelo, y se construyó el soporte del depósito de forma que éste se situase lo más cercano posible a la estructura, evitando de esta forma balanceos en el aire que pudiesen provocar alteraciones en el vuelo.

Respecto al sistema aplicador, los caudales de cada una de las boquillas fueron ensayados en laboratorio, recogiendo las muestras en probetas y obteniendo un caudal medio de 0.22 L/min para cada una de ellas al máximo régimen de giro de la bomba.

Evaluación económica. Una vez definidas las máquinas que realizan las diferentes operaciones y sus capacidades, se puede abordar la previsión de costes de utilización. En primer lugar, se realiza la evaluación económica del conjunto tractor e implemento, para la que se toman los siguientes criterios: se evaluarán por un lado los costes fijos (CF), entre los que se incluyen la amortización (mediante un procedimiento "combinado" en el que se consideran simultáneamente la obsolescencia y el desgaste de la máquina), los intereses, el coste del alojamiento y los seguros e impuestos aplicables al conjunto. Por otro lado, se calculan los costes variables (CV), entre los que se incluyen el consumo de combustibles y lubricantes, el desgaste de las cubiertas de las ruedas neumáticas, los costes globales de reparaciones y mantenimiento (CRM) y mano de obra del maquinista y auxiliar en su caso. Finalmente, se calcularán los costes totales horarios de la operación, resultantes de la suma del coste horario del tractor y el coste horario de la máquina.

Respecto a los costes fijos, se presentan a continuación las partidas evaluadas de amortización del equipo, intereses, alojamiento e impuestos. Respecto al coste de mano de obra del tractorista, se estima un coste de 10 €/h, incluyendo

Tabla 2. Resumen de Costes Tractor + Implemento

Costes Fijos Tractor + Implemento	Coste Amortización Tractor	1874.97 €/año
	Coste Amortización Pulverizador	632.66 €/año
	Coste de Interés	562.51 €/año
	Coste de Alojamiento	225 €/año
	Coste Seguros, Tasas, Impuestos	225 €/año
	TOTAL DE COSTES FIJOS por año	3520.14 €/año
	TOTAL DE COSTES FIJOS por hora	**3.52 €/h**
Costes Variables	Consumo de Combustible	10.29 €/h
	Consumo de Lubricante	0.21 €/h
	Consumo Aceite Hidráulico	0.30 €/h
	Desgaste Ruedas	0.6 €/h
	Reparación/Mantenimiento	1.08 €/h
	TOTAL COSTES VARIABLES por hora	**12.48 €/h**
Mano de Obra	**Tractorista (sueldo + SS)**	**10 €/h**
TOTAL DE COSTES APLICACIÓN TRACTOR CONVENCIONAL		**26 €/h**

sueldo y Seguridad Social. La Tabla 2 resume el total de los costes desglosados expuestos anteriormente.

El total de los costes de la aplicación convencional empleando tractor e implemento y sumando los costes fijos, los costes variables y los costes de operación es de 26 €/h aproximadamente.

Respecto al sistema ATHOS, se establece un periodo de vida útil de cinco años, con un número de horas de vuelo de cien horas al año. Los costes fijos de este tipo de sistema se recogen en la Tabla 3.

Nótese que no se incluyen costes de alojamiento en los costes fijos, por el menor tamaño del equipo, aunque en el caso de que se desarrollase una flota de equipos aéreos los autores consideran que sí se deberían incluir.

En los costes variables del sistema ATHOS se incluyen los costes de reparación y mantenimiento, con un valor de 150 €/año (1.50 €/h) y el coste del piloto fijado en 20 €/h. El coste total medio por hora del ATHOS será por tanto de 33.80 €/h.

Respecto a la superficie tratada por hora o rendimiento horario, éste se estima mediante el producto del ancho de trabajo (en metros) por la velocidad de avance (en kilómetros/hora), dividido entre 10. En el escenario antes descrito, el ancho de trabajo será de catorce metros (siete metros de separación entre filas, tratamiento en el 50 % de ellas) y la velocidad de avance la fijamos para ambos equipos en 10 km/h, con lo que obtenemos un rendimiento horario teórico de 14.7 ha/h.

En el caso del tractor, el rendimiento efectivo o real se puede estimar multiplicando el rendimiento teórico por un factor de 0.8, obteniendo un valor de 11.76 ha/h, lo que implica que la labor de aplicación en una hectárea puede ser realizada en 5.1 min.

Por otro lado, para el sistema ATHOS, el factor del rendimiento real o efectivo se puede aumentar a 0.9, ya que los giros y la maniobrabilidad en campo son mucho más rápidos y permiten no perder tanto tiempo en ellos. De esta forma, se obtendría un rendimiento real de 13.3 ha/h, o de 4.5 min/ha. Se debe tener en cuenta que la velocidad de 10 km/h fijada para el estudio podría ser aumentada en el caso del ATHOS hasta casi el doble, con lo que el tiempo estimado en realizar una aplicación en una hectárea se reduciría.

Tabla 3. Costes Fijos del sistema ATHOS desarrollado.

Declarar Operador Empresa/Autónomo	300 €
Licencia de piloto teórico/práctico/médico	900 €
Seguro del dron	200 €/año
Equipo de vuelo + Emisora	4000 €
Equipo de Pulverización	2500 €
4 Baterías	700 €
TOTAL DE COSTES FIJOS por hora	**12.3 €/h**

Conclusiones

Se ha realizado de forma satisfactoria el diseño y construcción de un modelo de pulverizador hidráulico de bajo coste (ATHOS), capaz de ser montado a bordo de una plataforma aérea y de realizar aplicaciones específicas de ultra-bajo volumen. Este equipo monta un depósito con carga máxima de cinco litros, y ha sido testeado en campo respecto a su comportamiento en vuelo y su viabilidad para realizar este tipo de aplicaciones, utilizando un producto comercial de cebo para la mosca del olivo. Además, se ha realizado un primer análisis comparativo de los costes de aplicación utilizando un equipo convencional (tractor+implemento) y el sistema ATHOS desarrollado. Las siguientes conclusiones pueden ser extraídas del presente trabajo:

- Los primeros resultados obtenidos tras el análisis apuntan a que no existe gran diferencia en los costes de aplicación entre la realizada mediante la plataforma aérea y el equipo convencional (33.80 €/ha frente a los 26 €/ha respectivamente). El análisis de los costes del equipo desarrollado se ha realizado en base a estimaciones por experiencia propia del equipo, ya que no existen todavía estudios económicos de este tipo de aplicaciones realizados por otros autores. Se espera que con la mayor adopción de este tipo de tecnologías en el futuro cercano, se realicen un mayor número de estudios al respecto.
- Se ha calculado que la capacidad en hectáreas por hora de un equipo como el ATHOS sería mayor que la de un equipo convencional, debido a que se pueden realizar tratamientos a mayor velocidad de avance y con mayor maniobrabilidad. El grupo de investigación pretende en posteriores trabajos evaluar la calidad y eficacia de este tipo de aplicaciones con esta y otras materias activas en distintos cultivos.
- El uso de equipos como el ATHOS puede representar una alternativa a la aplicación tradicional, pudiéndose realizar aplicaciones específicas en coordenadas concretas (parches de mala hierba, focos de enfermedades, etc.) sin que el operario entre en contacto con materias activas que podrían ser tóxicas y evitando la compactación del terreno debido al paso de tractores.
- Este nuevo paradigma en las aplicaciones aéreas localizadas, que pueden resultar beneficiosas en casos concretos, debe buscar que estas puedan ser realizadas en condiciones de seguridad operacional y jurídica. Esto debe motivar una revisión en la legislación vigente, que actualmente las equipara a aplicaciones con equipos de vuelo mucho más grandes (avionetas) que pueden generar problemática ambiental mucho más grave que el de los drones de pequeño tamaño.

Agradecimientos: Este artículo ha sido posible gracias en parte a la financiación del proyecto Nacional AGL2013-46343-R y la financiación de Dow AgroSciences. Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento al Grupo de Investigación AGR-278 Smart Biosystems Laboratory y a los técnicos de DRONSAP, división especializada en operaciones agrícolas con drones, de AGROSAP.