

# ENTREGABLE 17: ESTUDIO TÉCNICO COMPARATIVO PRESTACIONES PLATAFORMAS DETECCIÓN REMOTA

15/11/2022

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b><i>Introducción.....</i></b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b><i>Obtención de datos de teledetección de utilidad en agricultura. De los datos a la información: concepto general.....</i></b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b><i>Uso de la teledetección en la monitorización de cultivos.....</i></b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b><i>Requisitos de un sistema de Teledetección como apoyo a la toma de decisiones en agricultura.....</i></b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b><i>Tipos de plataformas de Teledetección.....</i></b>	<b>8</b>
<b>5.1</b>	<b><i>Plataformas espaciales.....</i></b>	<b>9</b>
<b>5.2</b>	<b><i>High altitude pseudo-satellite.....</i></b>	<b>11</b>
<b>5.3</b>	<b><i>Plataformas aéreas.....</i></b>	<b>11</b>
<b>5.3.1</b>	<b><i>Plataformas aéreas pilotadas.....</i></b>	<b>11</b>
<b>5.3.2</b>	<b><i>Sistemas aéreos no tripulados.....</i></b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b><i>Estudio económico uso de plataformas Teledetección en monitorización de cultivos.....</i></b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b><i>Referencias.....</i></b>	<b>18</b>

## 1 Introducción

La cumbre mundial sobre seguridad alimentaria declaró que para 2050 se espera que la población mundial alcance casi los diez mil millones de habitantes, aumentando la demanda agrícola, en un escenario de modesto crecimiento económico, en alrededor del 50 por ciento en comparación con 2013 [1]. Sin embargo, este aumento en la producción de alimentos debe ir acompañado de una gestión sostenible de las tierras agrícolas para detener o al menos ralentizar los impactos negativos sobre la calidad y cantidad de los recursos hídricos y del suelo, la degradación del suelo, las emisiones de gases de efecto invernadero o la biodiversidad [2]. La conversión de la agricultura intensiva a la sostenible debe llevarse a cabo en el contexto del cambio global, teniendo en cuenta condiciones climáticas inesperadas (por ejemplo, cambios en los patrones de temperatura y precipitación) o eventos climáticos extremos [3]. Esta conversión probablemente también estará fuertemente impulsada por la transición energética, ya que los biocombustibles pueden convertirse en una fuente significativa de energía [4] mientras que las actividades agrícolas tendrán que ser reubicadas para optimizar los costos de transporte y producción.

Ante este desafiante contexto para la agricultura, existe la necesidad de monitorizar el crecimiento y el estado de los cultivos bajo diferentes condiciones ambientales, con diversas resoluciones y para diferentes propósitos y objetivos tales como la monitorización casi en tiempo real para reaccionar a eventos extremos ante cambiantes condiciones climáticas, y así minimizar su impacto en el sistema alimentario global [5]; la optimización de las prácticas de gestión de manera sostenible mediante la optimización de insumos [6]; la predicción de rendimiento a corto plazo a escala global, regional y local para la mejora de la rentabilidad económica o la anticipación ante la posible escasez de alimentos y desarrollo de acciones para garantizar la seguridad alimentaria en las regiones más vulnerables del mundo [7]. Además de todo esto y con un enfoque a más largo plazo, el conocimiento adquirido en la monitorización y predicción en cultivos bajo condiciones concretas es de mucha utilidad para adaptar las prácticas culturales en otras localizaciones geográficas con diferentes o similares condiciones climáticas. En este escenario, la teledetección aparece como una herramienta de alto valor para asistir a los requisitos citados anteriormente, ofreciendo un medio no destructivo de proporcionar datos de forma recurrente a emplear desde escala local a global de manera sistemática, caracterizando la variabilidad espacio-temporal dentro de un área determinada.

El seguimiento y monitorización del desarrollo de los cultivos a través de la Teledetección ha sido abordado desde múltiples puntos de vista, basado en aplicaciones concretas (agricultura de precisión, predicción de rendimientos, riego, detección de malas hierbas), en plataformas específicas de teledetección (satélites,

vehículos aéreos no tripulados UAV, vehículos terrestres no tripulados -UGV-) o sensores específicos (sensores activos o pasivos, rangos de longitud de onda, resolución espacio-temporal) o contextos climáticos y ubicaciones específicas (país o continente, humedales o zonas secas). Todo esto ha generado en los últimos años un incremento en el uso de estas tecnologías en la gestión agronómica, así como una mayor oferta de servicios tecnológicos y un sustancial avance tecnológico, abarcando desde sensores con altas capacidades espaciales, temporales y espectrales, plataformas como nanosatélites o UAV, y el despliegue de servicios como la computación en la nube y técnicas de aprendizaje automático.

## **2 Obtención de datos de teledetección de utilidad en agricultura. De los datos a la información: concepto general.**

De forma resumida, la teledetección es la adquisición de datos de un objeto, superficie o fenómeno sin que exista contacto físico con el sensor empleado para realizar la observación. Esto implica embarcar un sensor en una plataforma bien espacial, aérea o terrestre tripulada o no tripulada (unmanned aerial / ground vehicle UAV/UGV). El sensor será el encargado de medir la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie. El tipo de dato observado dependerá directamente de las características técnicas, tanto del sensor, como de la plataforma donde quede embarcado, considerando en el caso de plataformas espaciales la órbita en caso de plataformas espaciales, el plan de trayectorias, posición y orientación del sensor o tipología del mismo, entre otros. Las características del sensor/plataforma definirán las capacidades y resolución de los datos adquiridos en sus dimensiones espectrales, espaciales, temporales y radiométricas. Además, será necesario tener en cuenta tanto las condiciones de iluminación como atmosféricas en el momento en que se registran los datos para que la cuantificación de la superficie analizada considere solamente sus propiedades radiativas [8].

En el caso concreto de la agricultura, los datos registrados pondrán de manifiesto las características o rasgos agronómicos del cultivo y, con especial interés e importancia cómo estos varían en el espacio y en el tiempo. Estas características pueden ser morfológicas, bioquímicas, estructurales, fisiológicas o fenológicas, influyendo plenamente en el rendimiento o la adaptabilidad de la planta y, pudiendo variar de un individuo (planta), grupo (cultivo) o sociedad (área geográfica) a otro individuo, grupo o sociedad [9]. El conjunto y naturaleza de características agronómicas es amplio, abarcando desde las tipológicas (tipo de cultivo), físicas (humedad del suelo, temperatura de la hoja), químicas (contenido de nitrógeno en hoja), biológicas (fenología del cultivo), estructurales (altura o volumen de copa) hasta las geométricas (densidad de plantación). Así, aspectos de especial relevancia e interés, como la productividad del cultivo, son el resultado de un conjunto de procesos biofísicos

interrelacionados en una ventana temporal concreta, por ejemplo, el ciclo de crecimiento del cultivo.

Resaltar que las características descritas anteriormente no es posible medirlas directamente mediante técnicas de teledetección, de forma que la relación entre lo que se mide, es decir, la radiación, y los rasgos o características agronómicas deben modelarse para poder estimar o inferir estos últimos a partir de los primeros. Dependiendo de la variable a estimar, la modelización será más o menos compleja, desde un tema meramente geométrico como es una medición LiDAR para estimar altura de planta o la estimación de área foliar considerando tanto las propiedades radiativas de la planta, como la reflectancia hasta geométricos como la inclinación, densidad o forma de la planta así como la estimación de la producción del cultivo, siendo esta una de las variables de mayor interés. Esta última, implica caracterizar y considerar múltiples variables como son las relacionadas con la atmósfera (radiación solar, temperatura, humedad del aire, precipitación, velocidad del viento), funcionamiento de la vegetación (fenología, crecimiento, fotosíntesis, evapotranspiración) o manejo y gestión del cultivo (poda, riego, abonado), perfil fértil, tipo de suelo o pendiente entre otros aspectos. La relación entre el dato de teledetección y las variables agronómicas se pueden establecer bien mediante métodos empíricos o bien con métodos mecanicistas. Los primeros comprenden aquellos métodos basados en la relación estadística entre una entrada-salida, necesitando por tanto de la adquisición de datos, mientras que los segundos se basan en la describir la relación entre entradas y salidas a través del análisis y descripción de las diferentes etapas y mecanismos involucrados mediante suposiciones y/o modelos [10]. Por tanto, dependiendo de la aplicación o el proceso agrícola, el problema puede resolverse mediante distintas aproximaciones. Por ejemplo, la estimación de rendimiento puede desarrollarse empíricamente mediante índices de vegetación (IVs) obtenidos a través de los valores observados de reflectancia de un sensor embarcado en una plataforma o bien, combinando mediante un modelo mecanicista, relacionando índices derivados de teledetección con modelos de crecimiento de cultivo basados en procesos.

La estimación de características y propiedades de los cultivos a partir de datos de teledetección no resulta una tarea sencilla debido a que los datos registrados aparecen limitados por las capacidades del sensor y/o la plataforma empleada y, a la presencia de ruido en ellos, no asegurando la estabilidad y calidad de la solución [11,12].

### **3 Uso de la teledetección en la monitorización de cultivos.**

Desde un primer momento, el sector agroalimentario fue considerado como uno de los primeros nichos de uso de este tipo de datos. Las primeras adquisiciones de datos

mediante sensores aerotransportados se realizaron sobre zonas agrícolas mostrando cómo la radiación térmica emitida era un buen indicador del contenido de agua del suelo y distintos índices de vegetación en las regiones del visible o del infrarrojo permitían diferenciar la presencia de vegetación, manifestando el gran potencial de estos datos para asistir en la toma de decisiones relativas al riego, la fertilización o la detección de plagas [13,14].

El lanzamiento del primer satélite del programa Landsat en 1972 impulsó la investigación del uso de la teledetección en el ámbito agrícola. Ese mismo año, el gran volumen de venta de grano a Rusia generó grandes distorsiones en el mercado de materias primas. Como consecuencia de esto se iniciaron grandes esfuerzos en la monitorización de los cultivos en todo el mundo, poniendo el foco en la estimación de superficies agrícolas, la identificación de cultivos y la predicción de rendimientos. En este contexto, con algunos datos históricos, meteorológicos e imágenes Landsat se comenzaron a desarrollar trabajos de estimaciones y previsiones de producción de cultivos en varios países, resultando los datos procedentes de Landsat fundamentales ya que muchas de las zonas de interés no podían ser visitadas por los técnicos.

Así, los beneficios fueron considerables, siendo de un valor incalculable. Sin embargo, las necesidades del agricultor no resultaron satisfechas. Prueba de ello es que el artículo publicado en Los Angeles Times el 4 de marzo de 1984 titulado “New satellite Will keep an eye on crops” indicaba que “se espera que los datos aportados por Landsat-5 sean de gran utilidad para los operadores del mercado de materias primas, los grandes intereses agrícolas, la búsqueda de petróleo, gas y minerales”. En ningún caso se mencionaban los intereses de los agricultores. Sin duda alguna, el inicio del programa Landsat supuso un gran avance y de un valor incalculable. Sin embargo, no fue diseñado para ofrecer datos en tiempo real para satisfacer las necesidades reales de los agricultores y así poder ser asistidos en la toma de decisiones cotidianas vinculadas al manejo de los cultivos. Esto implicaría que un programa de observación remota proporcione datos casi en tiempo real y, por tanto, con una resolución temporal casi diaria y con una resolución espacial que permita cubrir la gran variabilidad en cuanto a cultivos se refiere, desde extensivos a leñosos.

Por otro lado, la aplicación de la teledetección en cultivos se ha concentrado en la adquisición de escenas, no disponiendo de datos terrestres a escala parcela para ser empleados en sistemas expertos para responder a necesidades nutricionales y, si fuese económicamente viable, aportar la cantidad óptima de un determinado fertilizante. Las necesidades por parte del agricultor son muy diferentes, éste ya conoce qué cultivo y qué superficie tiene sembrada, pero lo que desconoce son sus condiciones, debiendo responder a preguntas de tipo ¿es necesario regar o tratar toda la parcela? o ¿qué extensión está afectada por un determinado hongo?



#### 4 Requisitos de un sistema de Teledetección como apoyo a la toma de decisiones en agricultura

Este tipo de sistemas tienen una serie de requisitos únicos apoyados en tres factores claves para que los datos sean de interés en agricultura: tiempo de respuesta, frecuencia de cobertura y resolución espacial, que junto con otros conjuntos de datos como meteorológicos, edafológicos y agronómicos permitan desarrollar modelos predictivos precisos y exactos.

El **tiempo de respuesta** es uno de los requisitos más importantes en la gestión y seguimiento de los cultivos. La Figura 1.a presenta desde un punto de vista teórico cómo los datos registrados por un sensor embarcado en una plataforma va degradando su utilidad a medida que avanza el tiempo. La máxima utilidad sería ofrecida por un sistema que ofreciera datos en cuasi tiempo real. Por otro lado, un sistema de teledetección que ofrezca a los usuarios los datos tras cinco días desde su captura inicial no sería de utilidad para poder hacer una recomendación, por ejemplo, sobre riego, dado que los daños en el cultivo ya se habrían producido.

Por otro lado, la **frecuencia** en la **adquisición de datos** es otro aspecto importante como muestra la Figura 1.b. Lo deseable sería poder contar con una capacidad de revisita diaria o en el momento justo y adecuado en el que son necesarios contar con los datos de teledetección. Por otro lado, según el uso de los datos es necesario acotar la franja horaria en su captura, por ejemplo, en el caso de aplicaciones basadas en estrés hídrico los datos deben ser capturados al medio día solar. Ante estas necesidades, hoy día a través de sistemas aéreos no tripuladas (Unmanned Aerial System, UAS) es posible registrar estos datos a demanda de las necesidades del cultivo. Además, hay iniciativas privadas mediante plataformas cubesat ofreciendo datos con una resolución temporal diaria. Por otro lado, los programas de observación de la Tierra (Earth Observation System, EOS) de resolución espacial media como Landsat o Copernicus ofrecen un poder de revisita alejadas de las necesidades de las demandas del agricultor. En este sentido, se está trabajando hoy día en la generación de repositorios de datos armonizados con la finalidad de mejorar la resolución temporal individual de los programas [15,16]. Finalmente, en los próximos años se tiene previsto densificar la constelación de satélites de algunos de los programas actuales, como Copernicus, que vendrán a mejorar sus prestaciones en el sector agroforestal.

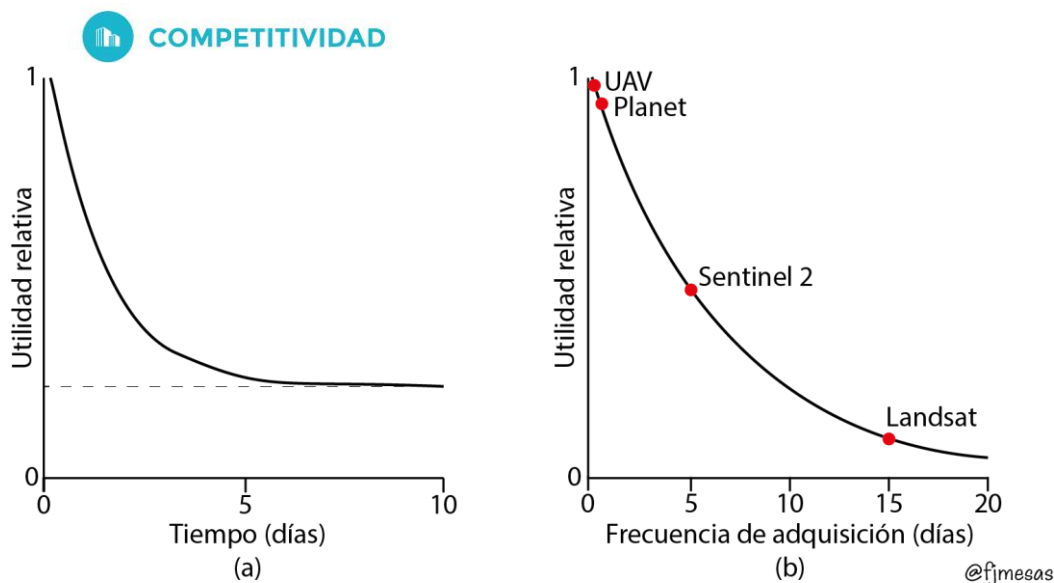


Figura 1 Utilidad relativa de los datos de teledetección en la gestión de cultivos según a) tiempo entre la adquisición del dato y la entrega del producto y, b) frecuencia de adquisición (basado en [17])

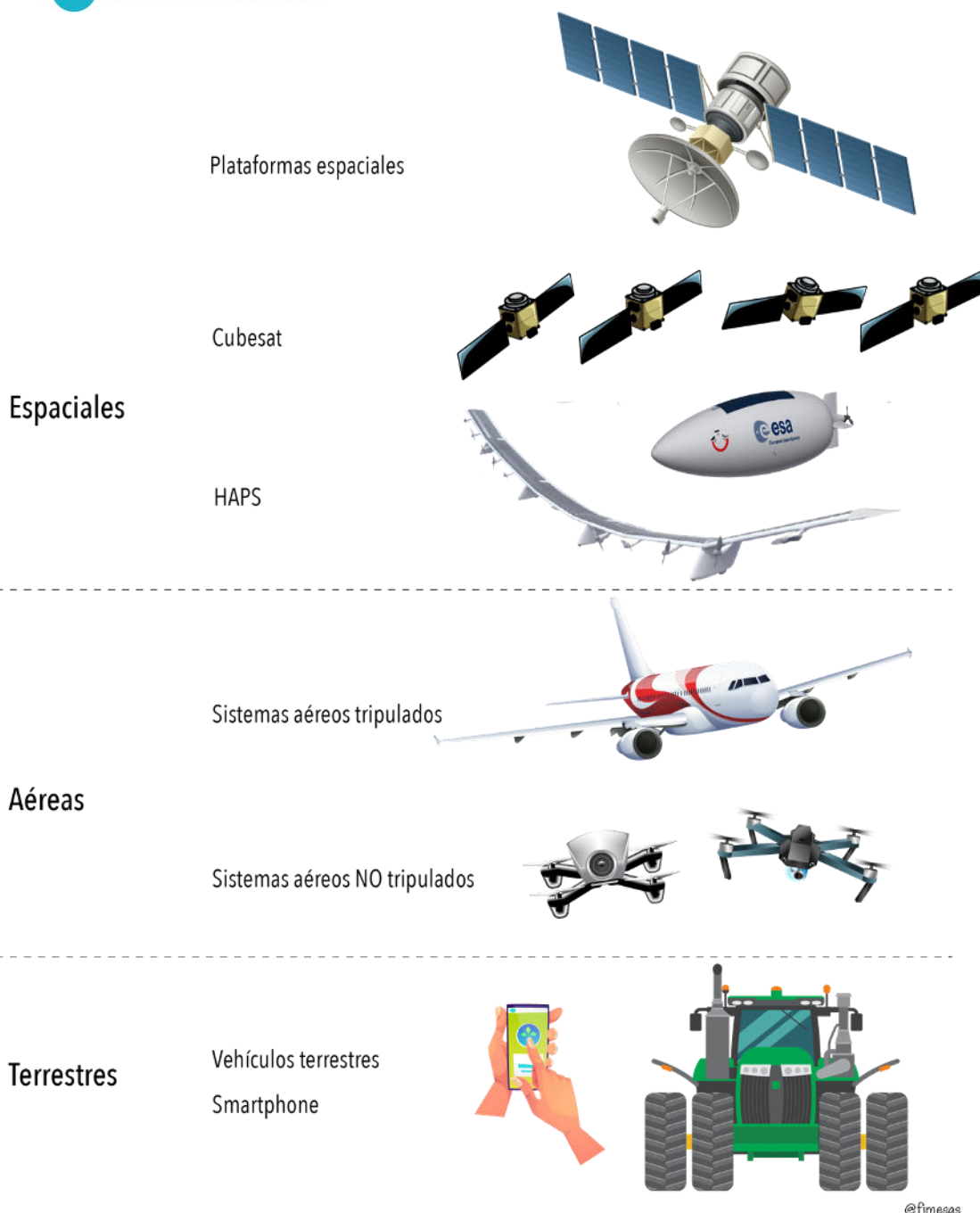
Por último, en cuanto a las necesidades considerando como variable la **resolución espacial**, dependerá en primer lugar de la aplicación que se pretende desarrollar con ellos y de las condiciones / características de la plantación. Por lo general, los datos ofrecidos por programas EOS como Landsat o Copernicus-2 mediante Sentinel-2, con resoluciones de 30x30 y 10x10 m respectivamente, son válidos para ser empleados sobre cultivos extensivos, no así sobre cultivos leñosos donde estas resoluciones no ofrecerían datos de reflectancia puros para caracterizar el cultivo. No obstante, es necesario tener en consideración distintos aspectos a la hora de determinar la utilidad de los datos de teledetección según este factor:

- Establecer el tamaño mínimo del objeto que, bien se desea detectar, igual a 21 veces el tamaño del píxel de la imagen (Ground Sample Distance, GSD) o, bien se desea interpretar (igual a 3 veces el GSD).
- Heterogeneidad del suelo, provocando diferencias en el crecimiento de las plantas.

## 5 Tipos de plataformas de Teledetección

Actualmente el usuario puede emplear diferentes plataformas de Teledetección resumidas en la Figura 2, cada una con unas resoluciones particulares que las hacen adecuadas para distintas aplicaciones en agricultura, las cuales son evaluadas en los siguientes apartados de esta sección.





@fjmezas

Figura 2 Tipos de plataformas de Teledetección según distancia sensor-objeto.

### 5.1 Plataformas espaciales

El uso de plataformas espaciales para su uso teledetección remota constituyen una tecnología consolidada que se ha utilizado con fines civiles desde el inicio de la década de los setenta con el lanzamiento de Landsat 1, evolucionando con el paso de los años, aumentando tanto la capacidad como la precisión de los datos proporcionados. En la actualidad, se han implementado varias constelaciones de satélites de observación de



la Tierra, que registran datos en longitudes de onda de radio (~2.5-100 cm), térmica (~8-14 m) y visible/infrarrojo cercano (~400-900 nm). Los satélites de observación de la Tierra, con sensores registrando datos entre 400 y 900 nm, son los más utilizados en agricultura, ya que permiten el cálculo de varios índices de vegetación. La mayoría de estos, con datos adecuados para fines agrícolas son gestionados por agencias gubernamentales, ofreciendo datos generalmente de forma gratuita o por empresas privadas, asociando un coste económico al dato.

En cuanto al modo de captura, algunas de las constelaciones de satélites adquieren datos de forma continua (Sentinel, Landsat, RapidEye, PlanetScope, Spot, etc.). Otras constelaciones adquieren datos según un plan de adquisición o bajo demanda (Worldview, Quickbird).

Debido a la distancia de observación (400-800 km, dependiendo de la órbita), las imágenes adquiridas por satélite se ven afectadas por distorsiones y ruido, lo que requiere correcciones geométricas y radiométricas. Además, las perturbaciones atmosféricas durante la adquisición por satélite requieren corrección atmosférica específica, lo cual es imposible en algunas condiciones (por ejemplo, nubes, niebla). Estas misiones tradicionales de satélite de una sola fuente son costosas y están físicamente limitadas en cuanto a resolución espacial y frecuencia de captura de imágenes. Por ejemplo, Landsat-8 continúa con una captura de datos de más de 40 años que ha demostrado tener una gran capacidad para la caracterización y monitorización de la superficie terrestre. Sin embargo, el ciclo de revisita de 16 días constituye una limitación importante para aplicaciones que requieren información temporal crítica sobre las condiciones de la superficie. Mejoras en la frecuencia espacio-temporal se han logrado mediante el par de satélites Sentinel-2, que proporcionarán datos multiespectrales de resolución de 10 a 60 m con una capacidad de revisita de cinco días. Además, las sinergias entre Landsat-8 y Sentinel-2 ofrecen oportunidades para mejorar aún más la resolución temporal. Sin embargo, los requisitos simultáneos de una resolución espacial muy alta (<10 m) y una frecuencia casi diaria solo se cumplen actualmente mediante la adquisición dirigida a través de sistemas comerciales multi-sensor programables como WorldView y RapidEye.

Recientemente se ha consolidado un nuevo enfoque para la observación de la Tierra por satélite, basado en la constelación de cientos de nanosatélites con una anchura de observación limitada, en lugar de constelaciones de 2-5 satélites con una amplia anchura de observación [18]. Este nuevo enfoque se ha hecho posible gracias a la disminución de los costes de lanzamiento a órbitas bajas.

La Figura 3 muestra la evolución del volumen de datos proporcionados por varias constelaciones a lo largo de los años, desde 1972 (lanzamiento del Landsat 1) hasta

2020, basándose en la investigación de Marinello et al. en 2019 [33]. El volumen de datos por hectárea y por año resume la información sobre las resoluciones espacial, espectral, radiométrica y temporal. A lo largo de 50 años, el volumen de datos por hectárea por año ha experimentado un aumento exponencial, pasando de  $100 \text{ B} \cdot (\text{ha} \cdot \text{año})^{-1}$  a  $100 \text{ MB} \cdot (\text{ha} \cdot \text{año})^{-1}$ . La gran cantidad de datos proporcionados de manera rápida y continua es una fortaleza de la teledetección remota por satélite en agricultura.

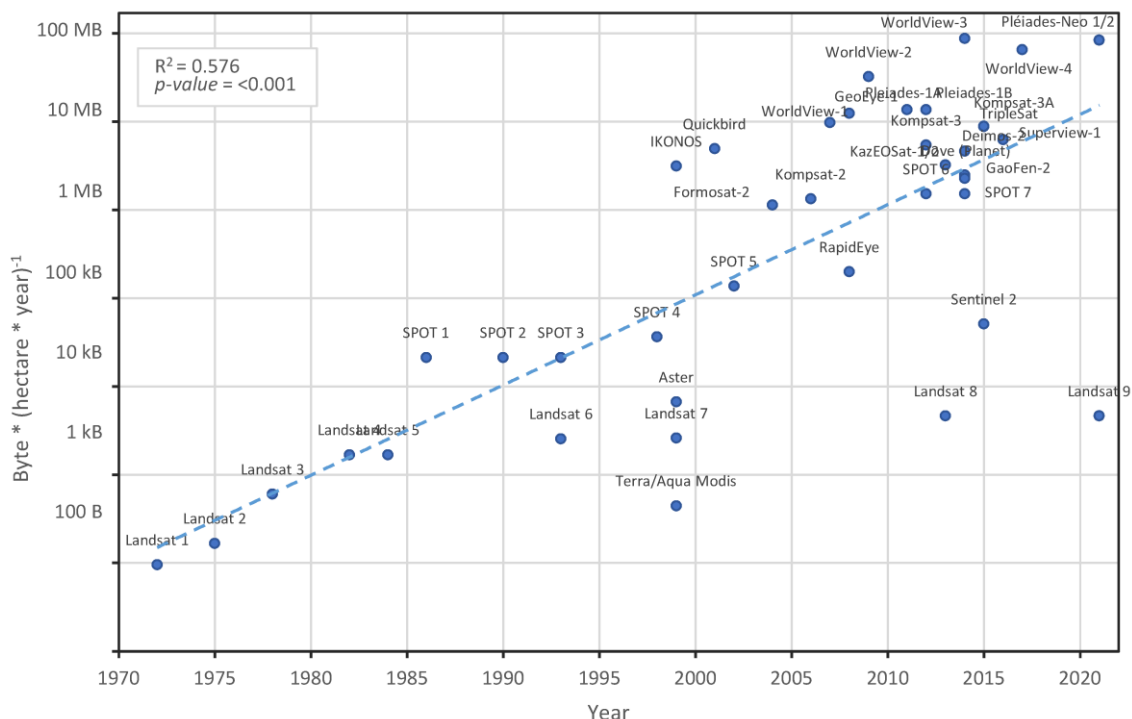


Figura 3 Evolución de volumen de datos por hectárea según diferentes constelaciones de satélite [19]

## 5.2 High altitude pseudo-satellite

Actualmente esta tipología no se encuentra operativa para aplicaciones y servicios comerciales, encontrándose en fase pre-comercial.

## 5.3 Plataformas aéreas

Dentro de esta categoría es necesario diferenciar entre aquellas pilotadas y no pilotadas.

### 5.3.1 Plataformas aéreas pilotadas

Dentro de este grupo se encuentran dos grandes grupos, tripuladas y no tripuladas. En primer lugar, las **plataformas aéreas tripuladas** se han empleado ampliamente para la

monitorización de la Tierra. Al igual que en el caso de los sensores embarcados en plataformas espaciales, esta tecnología fue desarrollada originalmente para usos no civiles. En la actualidad, los aviones pueden llevar sensores calibrados métrica y radiométricamente de muy diversos tipos (RGB, multi/hiper-espectrales, termográficos y LiDAR) capaces de analizar la geomorfología, la cobertura terrestre o las características de la vegetación. Las imágenes adquiridas por estos sensores embarcados en aviones requieren de la aplicación de procesos fotogramétricos para la generación de ortomosaicos sobre los que posteriormente aplicar técnicas de teledetección para caracterizar los cultivos. Para que esto sea posible, la observación de la Tierra desde aviones tripulados requiere de la configuración específica de planes de vuelo que garanticen la correcta generación de cartografía.

Si bien, este tipo de plataformas permite la generación de productos cartográficos de muy alta calidad, su coste operacional hace que sea empleada por administraciones y organismos gubernamentales para cartografiar grandes extensiones de territorio, no siendo viable para un uso individual de monitorización de parcelas agrícolas.

### **5.3.2 Sistemas aéreos no tripulados**

Los UAV o Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS) son una tecnología relativamente nueva en la agricultura de precisión que se ha extendido entre los usuarios agrícolas a partir de los primeros años de la década 2000. Gracias a la miniaturización y reducción de peso de los sensores es posible embarcar cualquier tipo de tecnología de sensores como en el caso anterior para generar, cartografía y aplicar técnicas de teledetección [20–23]. Dado que es necesario emplear técnicas fotogramétricas para la generación de cartografía, las imágenes adquiridas deben presentar un solape longitudinal y transversal como en el caso de las plataformas tripuladas, si bien este debe ser mayor debido a que los sensores empleados son no-métricos y las condiciones de captura no son estables, apareciendo cambios de escala y de inclinación del eje óptico del sensor.

Este tipo de plataformas destacan por su muy alta resolución espacio-temporal, siendo de mucho interés en su aplicación en cultivos leñosos.

Su aplicación en agricultura aparece vinculado a la tipología de sensor embarcado, resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1 Aplicaciones UAS según sensor

Sensor	Aplicaciones
RGB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartografía convencional (ortomosaicos y modelos digitales de elevaciones / superficies).</li> <li>• Detección de malas hierbas.</li> <li>• Determinación de parámetros estructurales (altura, superficie proyectada, volumen).</li> <li>• Conteo de plantas / marras.</li> <li>• Determinación de fracción de cabida cubierta.</li> <li>• Identificación / clasificación de objetos.</li> </ul>
Multiespectral	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinación de vigor de plantas, estado nutricional de plantas.</li> <li>• Presencia de enfermedades / plagas.</li> <li>• Detección de malas hierbas.</li> </ul>
Termográfico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicaciones vinculadas a la gestión del riego.</li> <li>• Presencia de enfermedades.</li> </ul>
LiDAR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinación de parámetros estructurales de la planta.</li> </ul>

## 6 Estudio económico uso de plataformas Teledetección en monitorización de cultivos

En este apartado se hace una evaluación de la rentabilidad económica del uso de la Teledetección como herramienta de apoyo a aplicaciones vinculadas con la demanda de nitrógeno de un cereal.

Los índices de vegetación basados en satélites, aviones y UAV se pueden utilizar para mapear la variabilidad inter o intra-parcela y asistir en la toma de decisiones como por ejemplo la gestión de la tasa variable de los insumos. Sin embargo, la elección de los sensores más adecuados no siempre es una tarea fácil, ya que implica restricciones económicas y agronómicas. Además, los precios reales de estas diferentes tecnologías a veces no incluyen algunos costos (área mínima de vuelo, despegue, procesamiento,

etc.), lo que lleva a elecciones difíciles y poco informadas para los técnicos y administradores de las explotaciones agrícolas [24].

La Tabla 2 recoge el área de pedido mínimo, precio y volumen de datos por hectárea y, resolución espacial, radiométrica y temporal de distintos programas de observación de la Tierra. En el caso de plataformas espaciales, el área de pedido mínimo en el caso de programas privados varía entre 2.500 y 10.000 hectáreas, representando la superficie mínima puesta a la venta por parte de los proveedores de imágenes. Esta superficie alcanza cifras muy alejadas de las necesidades del usuario final, el cual solo empleará una parte de toda la superficie. Por tanto, a la hora de realizar un análisis de costes deberá ser tenido en cuenta.

*Tabla 2 Características de programas de observación de la Tierra*

Programa	Superficie mínima [Ha]	Precio por Hectárea [€×Ha <sup>-1</sup> ]	Volumen datos por Hectárea [KN×Ha <sup>-1</sup> ]	Resolución		
				Espacial	Radiométrica	Temporal
Deimos-2	10000	0.055	12.7	0.75	10	2
Dove (Planet)	10000	0.011	8.89	3	16	1
Formosat-2	14400	0.028	3.13	2	8	1
GaoFen-2	2500	0.041	34.2	0.8	14	5
GeoEye-1	10000	0.250	102	0.5	11	3
KazEOSat-1	2500	0.057	6.25	3	12	1
Kompsat-2	2500	0.050	21.9	1	14	6
Kompsat-3	2500	0.100	44.6	0.7	14	3
Kompsat-3A	2500	0.145	72.3	0.55	14	3
Landsat-7/8/9	3700000	--	0.203	15	12	8
Pleiades-1	10000	0.193	75.0	0.5	12	1
Rapideye	10000	.011	3.00	5	12	5.5



 **COMPETITIVIDAD**

Sentinel-2	1200000	--	0.838	10	16	5
Spot	10000	0.041	8.33	1.5	12	1
Superview-1	10000	0.227	68.8	0.5	11	4
TripleSat	2500	0.073	24.4	0.8	10	1
WorldView	10000	0.250	179	0.3	11	1

Dada la variabilidad en las características de los distintos programas de observación de la Tierra, estos han sido clasificados en:

- Muy alta resolución (Very High Resolution, VHR) con resolución espacial inferior a 1 metro.
- Alta resolución (High Resolution, HR), con resolución espacial entre 1 y 5 metros.
- Resolución media (Medium Resolution), con resolución espacial mayor a 10 metros.

Independientemente del tipo de programa de observación de la Tierra, se han tenido en cuenta los siguientes costes:

- Coste de descarga: Se ha considerado un coste de  $0.93 \text{ €} \times \text{GB}^{-1}$  [25]. Si bien el coste de conexión de banda ancha es reducido, se ha tenido en cuenta para estimar el coste asociado a la cantidad de datos por hectárea.
- Correcciones: Si bien las escenas se entregan generalmente corregidas geométrica y radiométricamente, éstas, no siempre presentan valores de reflectancia referida a superficie. Según el tipo de programa se ha establecido un coste de corrección de 150€ para imágenes VHR, 100€ para HR y 50€ para MR. Estos costes están asociados a la escena y no a la superficie cubierta, siendo estimados según el coste medio de recursos humanos en Europa, igual a  $49.25 \text{ €} \times \text{hora}^{-1}$  [26].
- Coste de análisis para definición de zonas de manejo, mapas de prescripción y asesoramiento agronómico basado en algoritmos automáticos y no supervisados según programa de observación se estima en 75€ para VHR, 50€ para HR y 25€ en MR por imagen.

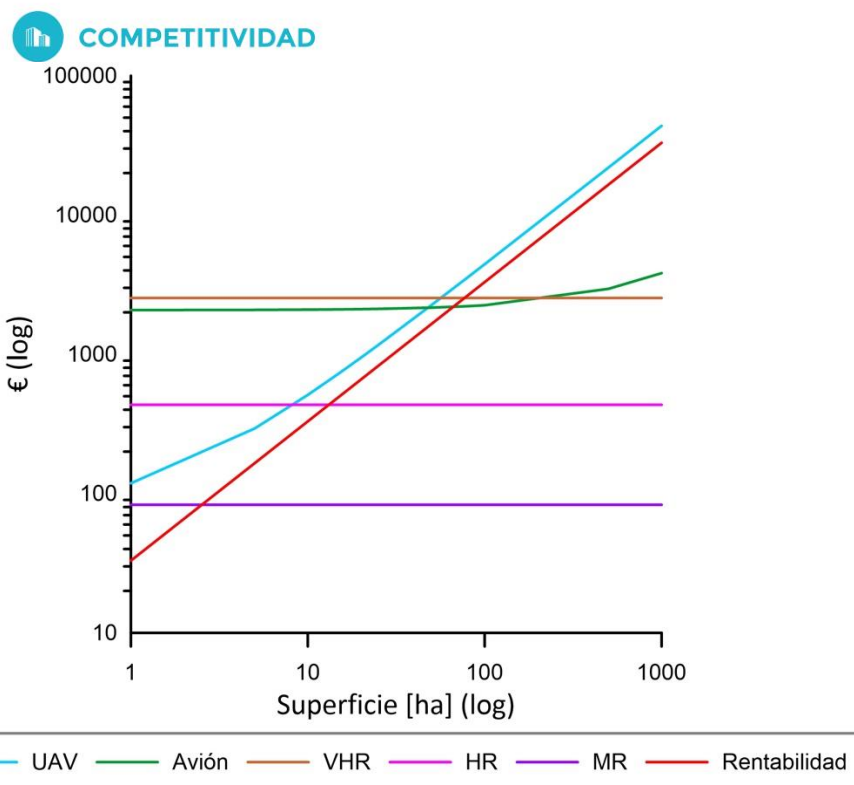
En el caso de plataformas áreas tripuladas, según estudio de mercado el precio por hectárea es de  $1.75 \times \text{ha}^{-1} \text{ €}$ , a lo que hay que añadir unos costes fijos igual a 2075€ de operación de vuelo. En el caso de plataformas no tripuladas, el coste por hectárea es de  $43.6 \text{ €} \times \text{ha}^{-1}$  sin necesidad de contratar una superficie mínima. En ambas plataformas



aéreas se ha estimado un coste de análisis igual a 75€ al igual que en las escenas en modo VHR.

Con estas cifras es necesario evaluar el beneficio aportado según el manejo realizado sobre el cultivo con objeto de conocer la viabilidad económica del trabajo. A modo de ejemplo, la

Figura 4 representa el coste del servicio ofrecido según distintas plataformas de Teledetección y el beneficio económico aportado por la dosificación variable de nitrógeno. Estos costes de producción han sido calculados atendiendo a lo descrito anteriormente. Por otro lado el beneficio económico se ha establecido según los trabajos de Colaço y Bramley [27] en cereal. La intersección entre la recta representando la rentabilidad económica (línea roja) y la evolución de precios de los distintos servicios ofrecidos según el tipo de plataforma representa el punto de equilibrio a partir del cual la aplicación de dosificación variable en base a ellos ofrece o no ventajas económicas. De este modo, las imágenes de satélite de resolución media como las ofrecidas por el programa Copernicus o Landsat son rentables en explotaciones de 2.5 has en adelante. En el caso de imágenes de alta resolución, la rentabilidad económica comienza a partir de superficies de 13 has, mientras que en muy alta resolución espacial se sitúan en superficies mayores a 76 has. En el caso de plataformas aéreas tripuladas la superficie mínima es rentable a partir de 66.5 has. Por último, la aplicación de plataformas aéreas no tripuladas en términos económicos no resulta atractivo para este tipo de aplicaciones.



*Figura 4 Punto de equilibrio de diferentes plataformas de Teledetección empleadas en la aplicación de dosificación variable de nitrógeno.*

La simulación realizada se ha realizado considerando un escenario de uso en la dosificación variable de nitrógeno, no reflejando los rendimientos en trabajos relacionados con el riego o la aplicación de herbicidas, pudiendo tener un impacto significativo en los resultados. Este análisis contempla la dimensión económica siendo necesario considerar aspectos técnicos de importancia como la resolución temporal de los datos, tanto en la captura, como en el tiempo en el que el usuario dispone del producto final.

## 7 Referencias

1. FAO *The Future of Food and Agriculture—Trends and Challenges. The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges*; Rome, 2017;
2. Gomiero, T.; Pimentel, D.; Paoletti, M.G. Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture. *CRC. Crit. Rev. Plant Sci.* **2011**, *30*, 95–124, doi:10.1080/07352689.2011.554355.
3. Tirado, M.C.; Clarke, R.; Jaykus, L.A.; McQuatters-Gollop, A.; Frank, J.M. Climate Change and Food Safety: A Review. *Food Res. Int.* **2010**, *43*, 1745–1765, doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.07.003.
4. Demirbas, A. Political, Economic and Environmental Impacts of Biofuels: A Review. *Appl. Energy* **2009**, *86*, S108–S117, doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.036.
5. Wheeler, T.; von Braun, J. Climate Change Impacts on Global Food Security. *Science (80-. )*. **2013**, *341*, 508–513, doi:10.1126/science.1239402.
6. Areal, F.J.; Jones, P.J.; Mortimer, S.R.; Wilson, P. Measuring Sustainable Intensification: Combining Composite Indicators and Efficiency Analysis to Account for Positive Externalities in Cereal Production. *Land use policy* **2018**, *75*, 314–326, doi:https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.001.
7. Di Falco, S.; Yesuf, M.; Kohlin, G.; Ringler, C. Estimating the Impact of Climate Change on Agriculture in Low-Income Countries: Household Level Evidence from the Nile Basin, Ethiopia. *Environ. Resour. Econ.* **2012**, *52*, 457–478, doi:10.1007/s10640-011-9538-y.
8. Roy, D.P.; Ju, J.; Lewis, P.; Schaaf, C.; Gao, F.; Hansen, M.; Lindquist, E. Multi-Temporal MODIS–Landsat Data Fusion for Relative Radiometric Normalization, Gap Filling, and Prediction of Landsat Data. *Remote Sens. Environ.* **2008**, *112*, 3112–3130, doi:https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.009.
9. Nock, C.A.; Vogt, R.J.; Beisner, B.E. Functional Traits. *Encycl. life Sci.* **2016**.
10. Baker, R.E.; Peña, J.-M.; Jayamohan, J.; Jérusalem, A. Mechanistic Models versus Machine Learning, a Fight Worth Fighting for the Biological Community? *Biol. Lett.* **2018**, *14*, 20170660, doi:10.1098/rsbl.2017.0660.
11. Wang, Y. Quantitative Remote Sensing Inversion in Earth Science: Theory and Numerical Treatment BT - Handbook of Geomathematics. In; Freedon, W., Nashed, M.Z., Sonar, T., Eds.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2015; pp. 1775–1806 ISBN 978-3-642-54551-1.

12. Baret, F.; Buis, S. Estimating Canopy Characteristics from Remote Sensing Observations: Review of Methods and Associated Problems BT - Advances in Land Remote Sensing: System, Modeling, Inversion and Application. In; Liang, S., Ed.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2008; pp. 173–201 ISBN 978-1-4020-6450-0.
13. Luney, P.R.; Dill, H.W. *Uses, Potentialities, and Needs in Agriculture and Forestry.*; Washington, D.C.: National Academy of Sciences., 1970;
14. Park, A.B.; Colwell, R.N.; Meyers, V.F. Resource Survey by Satellite; Science Fiction Coming True. *Yearb. Agric.* **1968**, 13–19.
15. Claverie, M.; Ju, J.; Masek, J.G.; Dungan, J.L.; Vermote, E.F.; Roger, J.-C.; Skakun, S. V; Justice, C. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 Surface Reflectance Data Set. *Remote Sens. Environ.* **2018**, *219*, 145–161, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>.
16. Agency European Space Harmonised Landsat-8 and Sentinel-2 Analysis-Ready Products Available online: <https://eo4society.esa.int/projects/harmonised-landsat-8-and-sentinel-2-analysis-ready-products/> (accessed on 1 March 2023).
17. Jackson, R.D. Remote Sensing Of Vegetation Characteristics For Farm Management. In Proceedings of the Proc.SPIE; October 16 1984; Vol. 0475, pp. 81–97.
18. Houborg, R.; McCabe, M.F. High-Resolution NDVI from Planet’s Constellation of Earth Observing Nano-Satellites: A New Data Source for Precision Agriculture. *Remote Sens.* 2016, *8*.
19. Sozzi, M.; Kayad, A.; Gobbo, S.; Cogato, A.; Sartori, L.; Marinello, F. Economic Comparison of Satellite, Plane and UAV-Acquired NDVI Images for Site-Specific Nitrogen Application: Observations from Italy. *Agronomy* 2021, *11*.
20. Mesas-Carrascosa, F.-J.; Pérez-Porras, F.; de Larriva, J.E.; Mena Frau, C.; Agüera-Vega, F.; Carvajal-Ramírez, F.; Martínez-Carricondo, P.; García-Ferrer, A. Drift Correction of Lightweight Microbolometer Thermal Sensors On-Board Unmanned Aerial Vehicles. *Remote Sens.* **2018**, *10*, doi:10.3390/rs10040615.
21. Santos-Rufo, A.; Mesas-Carrascosa, F.-J.; García-Ferrer, A.; Meroño-Larriva, J.E. Wavelength Selection Method Based on Partial Least Square from Hyperspectral Unmanned Aerial Vehicle Orthomosaic of Irrigated Olive Orchards. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 3426.

22. Mesas-Carrascosa, F.-J.; de Castro, A.I.; Torres-Sánchez, J.; Triviño-Tarradas, P.; Jiménez-Brenes, F.M.; García-Ferrer, A.; López-Granados, F. Classification of 3D Point Clouds Using Color Vegetation Indices for Precision Viticulture and Digitizing Applications. *Remote Sens.* **2020**, *12*, doi:10.3390/rs12020317.
23. Mesas-Carrascosa, F.J.; Clavero Rumbao, I.; Torres-Sánchez, J.; García-Ferrer, A.; Peña, J.M.; López Granados, F. Accurate Ortho-Mosaicked Six-Band Multispectral UAV Images as Affected by Mission Planning for Precision Agriculture Proposes. *Int. J. Remote Sens.* **2017**, *38*, 2161–2176, doi:10.1080/01431161.2016.1249311.
24. Sozzi, M.; Kayad, A.; Giora, D.; Sartori, L.; Marinello, F. Cost-Effectiveness and Performance of Optical Satellites Constellation for Precision Agriculture. In *Precision agriculture'19*; Wageningen Academic Publishers, 2019; pp. 1–17.
25. *Empirica Gesellschaft Für Kommunikations-Und Technologieforschung MbH; TÜV Rheinland. Mobile Broadband Prices in Europe*; Luxembourg, 2019;
26. *Eurostat. Labour Cost, Wages and Salaries, Direct Remuneration (Excluding Apprentices) by NACE Rev. 2 Activity)—LCS Surveys 2008, 2012 and 2016*; Luxembourg, 2016;
27. Colaço, A.F.; Bramley, R.G. V Do Crop Sensors Promote Improved Nitrogen Management in Grain Crops? *F. Crop. Res.* **2018**, *218*, 126–140, doi:https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007.



