

ENTREGABLE 3.11: INFORME RESULTADOS SENSORES TERMOGRÁFICOS ALTAS PRESTACIONES A 3 KM ALTURA AGL

(Versión 1.1 - 4/julio/2022)

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	ANTECEDENTES.....	4
1.1.1	Interés de las imágenes de teledetección en agricultura	4
1.1.2	El papel de campañas experimentales	5
1.1.3	El archivo de datos AHS-INTA.....	5
1.2	OBJETIVOS.....	6
1.3	DEFINICIONES Y ACRÓNIMOS	6
2	MATERIAL	8
2.1.	SENSOR AHS.....	8
2.2	PRODUCTOS IMAGEN	9
2.3	CAMPAÑAS DE VUELO	10
I.	CAMPAÑA IFARE 2017	10
2.3.1	CAMPAÑA CEOS-SPAIN 2015	12
2.3.2	CAMPAÑAS DSHSR 2015 y 2016	15
3	MÉTODOS	18
3.1	Resolución espacial.....	18
3.2	Ruido (NedT)	19
3.3	Relación Señal/Ruido (SNR)	19
3.4	Rango de temperaturas	19
3.5	Efecto de la atmósfera.....	19
3.6	Contenido en información de productos L2.....	20
4	RESULTADOS.....	21
4.1	Características geométricas.....	21
4.2	Ruido, SNR, rango térmico.....	24
4.3	Efecto de la atmósfera	24
4.4	Información L2.....	25
5	DISCUSIÓN	26

 **COMPETITIVIDAD**

6	CONCLUSIONES.....	27
7	REFERENCIAS	28



1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 Interés de las imágenes de teledetección en agricultura

Las imágenes de teledetección tienen innumerables aplicaciones agrícolas. Una revisión reciente se encuentra en Weiss *et al.* (2020).

En esta revisión se distingue entre variables primarias y secundarias. Las primarias son aquellas que están directamente implicadas en la interacción de la radiación electromagnética con el cultivo; estas variables necesitan un modelo simple para ser obtenidas a partir de datos de teledetección. Las secundarias están indirectamente implicadas en la transferencia radiativa y necesitan un modelo complejo y mucha información externa para ser obtenidas a partir de datos de teledetección.

Ejemplos de las primeras son:

- monitorización del índice de área foliar a través del NDVI,
- temperatura, un indicador de stress hídrico y estado de salud,
- humedad del suelo.

Entre las segundas encontramos aplicaciones avanzadas como:

- identificación de cultivos,
- evapotranspiración real, como indicador de las necesidades de riego,
- predicción del rendimiento de la cosecha.

El diseño de una misión operacional de teledetección que beneficie la capacitación e innovación digital del sector agroalimentario debe considerar prioritariamente esas aplicaciones, manteniendo, si es posible, la posibilidad de servir a otros usuarios (forestales, calidad de aguas, etc.).

Por otra parte, de las aplicaciones posibles, algunas utilizan información en el rango espectral solar, habitualmente en el tramo visible e infrarrojo próximo (VNIR) y ocasionalmente también en el infrarrojo medio (SWIR). Otras, a cambio, necesitan del uso de imágenes en el rango espectral térmico (TIR); estas últimas encuentran más limitaciones a la hora de utilizar datos de plataformas espaciales y, por tanto, es necesario explorar la potencialidad de plataformas aéreas o HAPS.

Por último, sería necesario revisar los requisitos radiométricos y espaciales que deben tener las imágenes térmicas para ser útiles en agricultura. Lógicamente, esto depende mucho de la variable que objetivo, es decir de la aplicación que se le dé a la información termográfica. Sin embargo, es conveniente manejar unos valores genéricos que permitan valorar los datos disponibles para un amplio rango de aplicaciones. En nuestro caso, usaremos de referencia:



- incertidumbre absoluta en temperatura (calibración) menor que 1.5 K
- error relativo (debido al ruido) menor que 0.5 K
- resolución espacial para trabajos a escala de parcela menor que 10 m.

1.1.2 El papel de campañas experimentales

Los datos de campañas experimentales conforman habitualmente el material previo más idóneo para el diseño de sistemas operacionales basados en datos de observación de la tierra. Esto es así ya que:

- se puede experimentar la variación de ciertos parámetros del sistema a diseñar (tamaño de píxel, configuración espectral...) o de las condiciones de observación (rumbo, hora de adquisición...);
- se pueden registrar simultáneamente datos in situ;
- pueden elegirse zonas bien documentadas y monitorizadas.

Los datos de campañas experimentales se utilizan en dos líneas de trabajo:

- la simulación de las imágenes de la futura misión, cubriendo las posibles opciones en discusión, y
- el establecimiento de relaciones entre variables de interés (derivadas de medidas in situ) y los datos simulados.

Es importante recordar que, para que la simulación sea valiosa, debe partir de mejor resolución espacial, radiométrica y espectral que el sensor a simular (Segl et al., 2015). Por tanto, si se van a usar imágenes reales (no sintéticas) se requiere acudir a un sensor térmico de altas prestaciones, como el que se ha utilizado para este trabajo (ver sección 2. 1).

En cuanto a las condiciones de adquisición, y en el caso del presente entregable, se ha elegido una altura de vuelo cercana a 3 km sobre el terreno, ya que:

- permite cubrir un área de terreno significativa, manteniendo a la vez una resolución espacial adecuada, y
- es representativa en el aspecto radiométrico, ya que la interferencia atmosférica más significativa se produce dentro de la capa límite de la atmósfera (los primeros 2 km desde el terreno) y el resto de procesos radiométricos son independientes de la altura.

1.1.3 El archivo de datos AHS-INTA

El INTA opera desde 2003 un sistema aeroportado de teledetección hiperespectral y multiespectral térmica. Este sistema se ha utilizado numerosas veces en campañas experimentales para la puesta a punto de misiones y productos basados en datos de observación de la tierra. El sistema incluye tres sensores complementarios: AHS, CASI y



(desde 2019) Headwall CFL. El AHS registra datos en las regiones VNIR, SWIR y TIR. El CASI solo trabaja en la región VNIR, pero con alta resolución espectral (hasta 288 bandas). Por último, el CFL muestrea muy finamente (cada 0.051 nm, aunque con ancho de banda ≈ 0.2 nm) el rango entre 670 y 780 nm.

El archivo de imágenes asociado es de gran interés para estudios como HIBA y va a ser la fuente principal de datos para los entregables 11, 12 y 14 de la actividad 3.

Hay que advertir que para caracterizar la utilidad de las imágenes disponibles no influyen solamente las características del sensor, sino también las condiciones de la adquisición. En primer lugar, por la variedad y estado de desarrollo de los cultivos observados en el momento de la adquisición, pero también por circunstancias como la geometría de observación, la hora de registro de la imagen o la meteorología en los días precedentes. Por todo ello, la información contenida en los datos de archivo debe discutirse cuidadosamente.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este documento es describir las imágenes que conforman el entregable 14 y discutir la información que contienen, especialmente en el rango térmico, incluyendo la influencia de las condiciones de adquisición.

Queremos especialmente discutir si cumplen los requisitos de resolución y cobertura para ser usadas en la evaluación o simulación de una misión HAPS.

1.3 DEFINICIONES Y ACRÓNIMOS

ET	Evapotranspiración de la superficie terrestre.
GIFOV	(<i>Ground IFOV</i>). Proyección sobre la superficie observada del ángulo de visión instantáneo de cada elemento imagen del sensor.
GSD	(<i>Ground Sampling Distance</i>). Distancia entre centros de dos píxeles consecutivos en la dirección de avance o en la dirección transversal al avance de la plataforma.
HAPS	<i>High Altitude Pseudo Satellite</i> ; plataformas no tripuladas volando a gran altitud (> 10 km) con capacidad de permanecer largos tiempos sobre zonas geográficas determinadas.
HRDF	(<i>Hemispherical-directional Reflectance Factor</i>): factor de reflectancia para iluminación global y observación direccional.
Hiperspectral	Sensor con un número alto de bandas estrechas y contiguas que permiten la reconstrucción de un segmento relevante de la curva de respuesta espectral del terreno.



COMPETITIVIDAD

IFOV	<i>(Instantaneous Field of View)</i> . Ángulo de visión instantáneo de cada elemento imagen del sensor.
MTF	<i>(Modulation Transfer Function)</i> . Función de transferencia de modulación de un sistema óptico.
NDVI	<i>(Normalized Difference Vegetation Index)</i> : índice espectral de vegetación por diferencia normalizada.
NedL	<i>(Noise Equivalent delta Radiance)</i> . Equivalente en radiancia del ruido.
NEdT	<i>(Noise Equivalent delta Temperature)</i> . Equivalente en temperatura del ruido.
Nivel L0	Datos registrados por el instrumento, reconstruidos, pero sin procesar. La información necesaria para el proceso posterior acompaña a la medición, pero no se ha utilizado.
Nivel L1	Datos nivel L0 reformateados para su distribución o proceso posterior, con información suplementaria (metadatos) adjunta.
Nivel L1b	Datos nivel L1a corregidos radiométricamente y calibrados, transformados a unidades físicas (típicamente radiancia espectral). Se puede ofrecer remuestreado en malla cartográfica o en la geometría original de adquisición.
Nivel L2	Variables de la superficie terrestre obtenidas a partir de los datos del sensor mediante transformaciones simples, aproximadamente a la misma resolución espacial que el dato nivel L1. Pueden estar remuestreadas en malla cartográfica o en la geometría original de adquisición.
Rango solar	Región del espectro electromagnético entre 0.4 y 2.5 micrómetros, donde la energía dominante es la radiación solar reflejada por el terreno.
Rango térmico	Región del espectro electromagnético entre 8 y 13 micrómetros, donde la energía dominante es la radiación emitida por el terreno.
Resolución espacial	Capacidad de un sensor de teledetección de diferenciar información según su posición sobre el terreno.
Resolución espectral	Número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor.
Sensor	En teledetección, sensor es un radiómetro formador de imágenes operado desde una plataforma remota (aeronave o satélite).



SWIR	(<i>Short Wave Near InfraRed</i>): región del espectro electromagnético entre 1 y 2.5 micrómetros.
TVDI	(<i>Temperature Vegetation Dryness Index</i>): índice espectral para relacionar temperatura y sequedad de la vegetación.
TIR	(<i>Thermal InfraRed</i>): rango espectral térmico.
VNIR	(<i>Visible and Near InfraRed</i>): región del espectro electromagnético entre 0.4 y 1 micrómetros.

2 MATERIAL

2.1. SENSOR AHS

El AHS (*Airborne Hyperspectral System*) es un radiómetro hiperespectral que proporciona imágenes en 80 canales espectrales distribuidos desde la región del espectro visible hasta el infrarrojo térmico, con una resolución espacial que depende de la altura de vuelo y está comprendida entre 2.5 y 7 metros.

El AHS se opera nominalmente desde una aeronave CASA C-212-200 del INTA, adecuadamente equipada para campañas de teledetección.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL SENSOR AHS:

- Diseño óptico: barrido por espejo giratorio, óptica primaria reflectiva (tipo gregoriano afocal) con IFOV único y común para todas las bandas
- FOV: 90°
- IFOV: 2,5 mrad
- Velocidad de barrido del espejo: 6.25; 12.5; 18.7; 25; 35 rps.
- Cinco puertos ópticos que cubren las regiones espectrales VIS/NIR, SWIR, MIR y TIR (tabla 2.1)

	Puerto 1 VIS / NIR	Puerto 2A	Puerto 2 SWIR	Puerto 3 MIR	Puerto 4 TIR
Límite espectral (micrómetros)	0.442 - 1.019	1.55 – 1.65	1.9 – 2.5	3.03 – 5.41	8.0 – 13.2
Nº de bandas	20	1	42	7	10
Ancho espectral (nanómetros)	28	90	18	30 - 40	400 - 550

Tabla 2.1 Configuración espectral del sensor multiespectral aeroportado AHS.



COMPETITIVIDAD

- Detectores: matriz lineal de fotodiodos de silicio para el puerto 1, de InGaAs en el puerto 2A, detectores de InSb en los puertos 2 y 3, y MCT en el puerto 4, estos últimos refrigerados con nitrógeno líquido a 77K
- Bits de digitalización: 12 bits
- Número de píxeles imagen: 750 píxeles/línea
- Fuentes de referencia internas: dos cuerpos negros cuya temperatura es seleccionable, son observados y registrados en cada línea imagen y proporcionan un valor de "radiancia cero" en los canales reflectivos (1, 2 y 2A) y niveles de referencia para la calibración de los canales "emisivos" de los puertos 3 y 4

Al AHS se añaden equipos de navegación y de calibración en laboratorio que permiten que el sistema disponga de toda la información auxiliar necesaria para un uso riguroso y cuantitativo de la información adquirida. Posteriormente, un sistema específico de proceso y archivo permite obtener desde los datos registrados en vuelo imágenes corregidas atmosféricamente y transformadas a magnitudes de la superficie, como reflectancia, emisividad y temperatura. Las imágenes están georreferenciadas con una exactitud de un píxel y en formato adecuado para su explotación en sistemas de información geográfica y herramientas habituales en teledetección.

2.2 PRODUCTOS IMAGEN

Los datos registrados por el AHS pasan por diversos procedimientos para facilitar su interpretación y análisis por el usuario. El resultado de cada procedimiento es un producto en un determinado nivel (*Level*) de proceso.

El producto básico desde el lado de la instrumentación es el nivel L1b: mediciones del instrumento calibradas y corregidas radiométricamente, en la disposición original del sensor. Hay un producto L1b por cada escena adquirida; como lo habitual es que se adquieran varias escenas por cada campaña de toma de imágenes, hay un número variable de productos L1b para una misma campaña o sesión de vuelos.

El producto destinado a tareas de explotación es llamado en el AHS nivel L2c (en otras misiones puede tener otro identificador). El producto L2c representa variables geofísicas de la superficie terrestre derivadas directamente de las medidas registradas por el AHS, georreferenciadas en malla cartográfica. Las variables L2c AHS nominales son reflectancia, emisividad y temperatura.

La reflectancia (en rigor HDRF, es decir, porcentaje de iluminación recibida desde todas las direcciones posibles reflejada en la dirección de observación) se calcula a partir de la medición L1b de las bandas en el espectro solar, considerando la iluminación global y eliminando el efecto de la atmósfera sobre la señal registrada. En el caso del AHS, este



proceso se realiza mediante un procedimiento basado en la herramienta comercial ATCOR4 (Richter y Schlapfer, 2002).

La emisividad y la temperatura se estiman eliminando el efecto de la atmósfera sobre la señal registrada y separando posteriormente el efecto de emisividad y temperatura en la radiancia emitida. El procedimiento elegido se basa en el algoritmo ANEM implementado en ATCOR4.

También pueden considerarse productos L2c aquellos que se obtienen de combinaciones de datos L2 que no requieren la entrada de datos de otras imágenes (otros sensores, otras fechas, etc.).

En HIBA se han utilizado tanto imágenes L1b como L2c:

- El producto L1b permite analizar las características radiométricas y geométricas nativas de la información registrada.
- El producto L2c permite la explotación temática. Hay un producto L2c por cada escena adquirida, habiendo varias escenas por cada campaña, y opcionalmente se unen en uno o varios mosaicos por campaña.

2.3 CAMPAÑAS DE VUELO

Se han seleccionado tres campañas del archivo de imágenes AHS disponible en el INTA. Los criterios de selección utilizados han sido:

- cubrir unidades territoriales regionales (NUTs III) de las áreas de cooperación 4 (Centro / Extremadura / Alentejo) y 5 (Alentejo / Algarve / Andalucía) del espacio POCTEP
- incluir zonas agrícolas con cultivos relevantes: olivar, viñedo, frutos secos o cítricos, y herbáceos extensivos.
- altura de vuelo cercana a 3000 m sobre el terreno
- vuelo en primavera o verano

Cada campaña se describe en su sección correspondiente.

I. CAMPAÑA IFARE 2017

La campaña IFARE (Incendio Forestal - AREnosillo) tuvo como objetivo principal adquirir imágenes del área quemada durante el incendio forestal de junio de 2017 entre Moguer y Matalascañas (Huelva), incluyendo las instalaciones del INTA en El Arenosillo. La campaña se realizó con financiación del INTA, y los productos imagen resultantes se utilizaron para estudios de I+D y se pusieron a disposición de organismos implicados en el estudio del incendio.

Aunque el objetivo era la zona quemada, la planificación del vuelo permitió la adquisición de imágenes sobre una zona más extensa, incluyendo parcelas agrícolas. En

particular, se cubre la zona agrícola al este de Moguer (ver figura 2.1-a). Hay un gran número de parcelas de cultivo bajo plástico, que en el momento del vuelo se encontraban en diferentes estados. En menor medida se encuentran frutales y cítricos, sobre todo en las cercanías de la laguna de las madres.

Las características principales de la campaña se recogen en la tabla 2.2

Fecha	29 junio 2017
Horas de vuelo	De 12:47 a 13:54 UTC
Tamaño de píxel en el nadir	≈ 5 m
Altura de vuelo	2750 m sobre el terreno
Pasadas	4 pasadas NW ←→ SE 30% solape lateral entre pasadas

Tabla 2.2 Características principales de la campaña IFARE17.



Figura 2.1-a Imágenes AHS obtenidas en Mazagón (Huelva), durante la campaña IFARE el 29/06/2017. En rojo se delimita la zona donde se encuentran las parcelas de cítricos utilizadas en alguno de los análisis.

Los usos del suelo más relevantes para HIBA son:

- Zona forestal, correspondiente a los pinares que ocupan el entorno de Doñana.
- Zona de cultivos bajo plástico en los alrededores de Moguer. En la fecha del vuelo estos cultivos están en diferentes fases, con plástico presente o retirado, y en estos casos, con vegetación activa o suelo ya libre de cultivo.
- Algunas parcelas de frutales y cítricos, como la finca mostrada en la figura 2.1-b.



Figura 2.1-b Parcelas de cítricos al noreste de Mazagón, en la zona volada durante la campaña IFARE el 29/06/2017. Izquierda: parcelas según el visor SIGPAC; derecha: imagen AHS con una composición en falso color.

2.3.1 CAMPAÑA CEOS-SPAIN 2015

La campaña CEOS-Spain se realizó para el proyecto "Calibración de satélites de Observación de la Tierra en España" (AYA2011-29334-C02-01), liderado por el investigador de la Unidad de Cambio Global de la Universidad de Valencia José A. Sobrino. El principal objetivo del proyecto CEOS-Spain fue la puesta en marcha de zonas experimentales en el territorio español que permitan la calibración de sensores de Observación de la Tierra y la validación de los productos generados a partir de los datos medidos por estos sensores.

La campaña tuvo como objetivo principal proporcionar una cobertura total del Parque Nacional y Natural de Doñana con el sensor AHS. Las imágenes adquiridas se han utilizado, por ejemplo, para la caracterización de zonas calibración y validación dentro del Parque Nacional de Doñana (Skokovic et al., 2017; Sobrino y Skokovic, 2016).

Las características principales de la campaña se recogen en la tabla 2.3.

Fecha	11 mayo 2015
Horas de vuelo	De 10:02 a 12:01 hora UTC
Tamaño de píxel en el nadir	≈ 6 m
Altura de vuelo	2750 m sobre el terreno
Pasadas	7 pasadas NW ←→ SE 30% solape lateral entre pasadas

Tabla 2.3 Características principales de la campaña CEOS15.

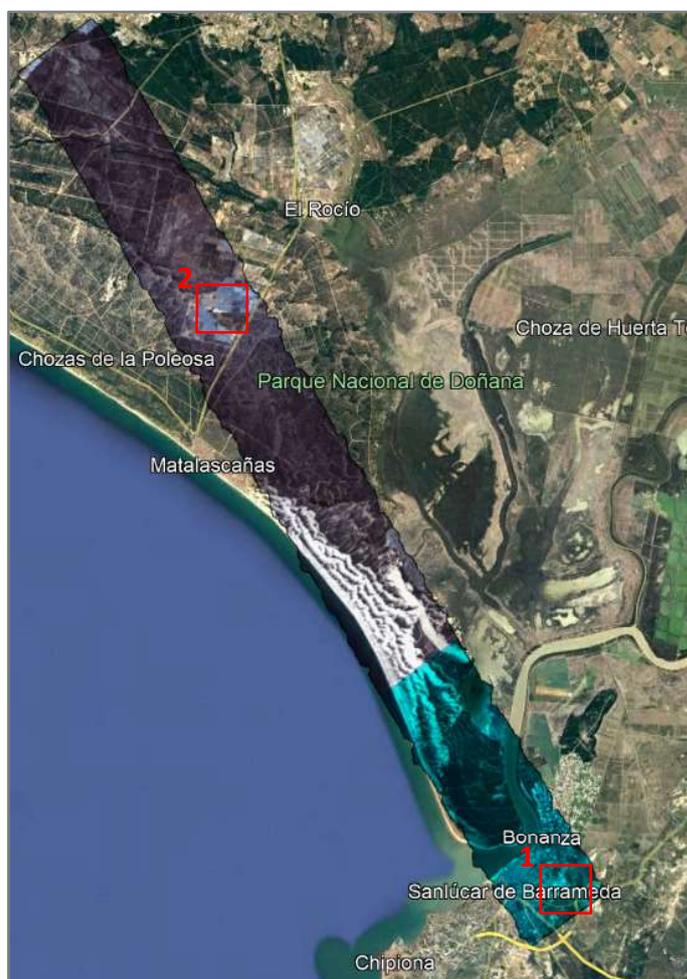


Figura 2.2-a Imagen AHS obtenida en las inmediaciones del Parque Nacional de Doñana, durante la campaña CEOS el 11/05/2015. En rojo se delimitan las zonas donde se encuentran las parcelas de interés (1: viñedo; 2: olivo).

Dentro de las imágenes adquiridas para el proyecto CEOS-Spain, los usos del suelo más relevantes para HIBA son:

- vegetación natural de pinares, matorrales y marisma dentro del Parque Nacional.
- cultivos de frutales, viñedo, olivo, fresa y arrozales en el entorno del Parque Nacional y Natural de Doñana y en las cercanías de Sanlúcar de Barrameda (Cádiz).



Figura 2.2-b Zona 1 con parcelas de viñedo en Sanlúcar de Barrameda (Cádiz), en el área volada durante la campaña CEOS el 11/05/2015. Izquierda: parcelas según el visor SIGPAC; derecha: imagen AHS con una composición en falso color.



Figura 2.2-c Zona 2 con parcelas de olivo entre las poblaciones de Matalascañas y El Rocío (Huelva), en el área volada durante la campaña CEOS el 11/05/2015. Izquierda: parcelas según el visor SIGPAC; derecha: imagen AHS con una composición en falso color.

2.3.2 CAMPAÑAS DHSR 2015 y 2016

El proyecto DEHESHyrE se desarrolló en el marco de la iniciativa EUFAR (*European Facility for Airborne Research*). Fue un proyecto liderado por los investigadores Mirco Migliavacca del Instituto alemán de Biogeoquímica Max Planck, y María Pilar Martín del CSIC.

EUFAR es un programa financiado por la Unión Europea (*Grant agreement 312609* dentro del programa *FP7 Infrastructures, INFRA-2021-1.1.13*). El archivo principal de EUFAR está gestionado por el *Centre for Environmental Data Analysis* (CEDA, UK). Los datos EUFAR están disponibles para cualquier usuario que se registre en el CEDA.

El objetivo de proyecto DEHESHyrE era la integración de datos de sensores ópticos y, específicamente, térmicos para el seguimiento a multiescala espacial y temporal de los flujos de agua, carbono y nutrientes en ecosistemas mediterráneos complejos.

En total se realizaron 4 campañas hiperespectrales aeroportadas sobre el sistema agroforestal de Dehesa de Majadas de Tiétar (Cáceres), que incluye varias torres de medida de flujos. Se realizaron tres campañas a lo largo del año 2015 en tres momentos fenológicos de la Dehesa a lo largo del año. En el año 2016 se realizó una sola campaña. Todas las campañas tuvieron una planificación de líneas de vuelo similar, con pasadas en diferentes rumbos, casi en forma de asterisco, para cubrir las torres de flujo existentes.

Las características principales de la campaña se recogen en la tabla 2.4.

Fechas	23 abril 2015	3 julio 2015	3 mayo 2016
Horas de vuelo (UTC)	10:25 a 12:08 10:56 a 12:03	10:56 a 12:13	11:05 a 12:25
Tamaño de píxel en el nadir	≈ 4 m		
Altura de vuelo	1839 m sobre el terreno		
Pasadas	9 pasadas solape entre pasadas		

Tabla 2.4 Características principales de las campañas para el proyecto DEHESHyrE.

Dentro de las imágenes adquiridas para el proyecto DEHESHyrE, los usos del suelo más relevantes para HIBA son:

- el aprovechamiento agrícola, ganadero y forestal que conjuga el ecosistema agroforestal de Dehesa, con las parcelas de arbolado disperso de encina y alcornoque;
- algunas parcelas de tamaño medio de cultivos de olivo y frutos secos.

El uso de los datos adquiridos para EUFAR está limitado por las condiciones expuestas en <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. La referencia adecuada para citar el origen de los datos es la siguiente:

INTA Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Spain; Migliavacca, M. (2018): DEHESHYRE: in-situ airborne observations by the CASA 212 RS - INTA aircraft aircraft. Centre for Environmental Data Analysis (CEDA). <http://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/29b566562d0c4a9b969c65874091e74a>

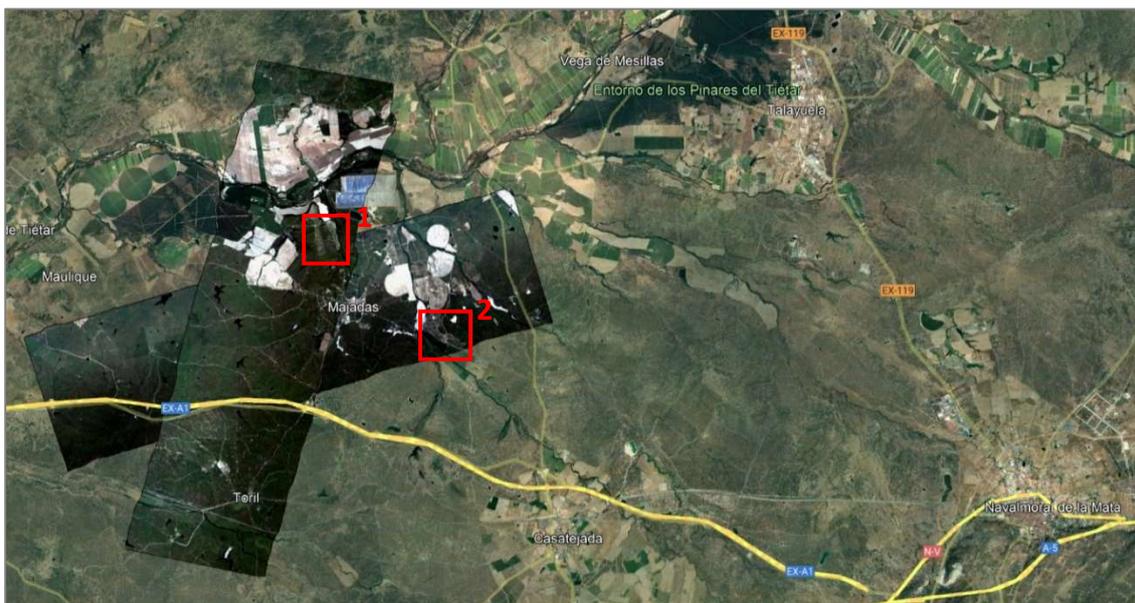


Figura 2.3-a Imágenes AHS obtenidas en Majadas de Tiétar (Cáceres), durante la campaña CEOSS el 03/07/2015. En rojo las zonas donde se encuentran las parcelas de interés, ambas de olivo.

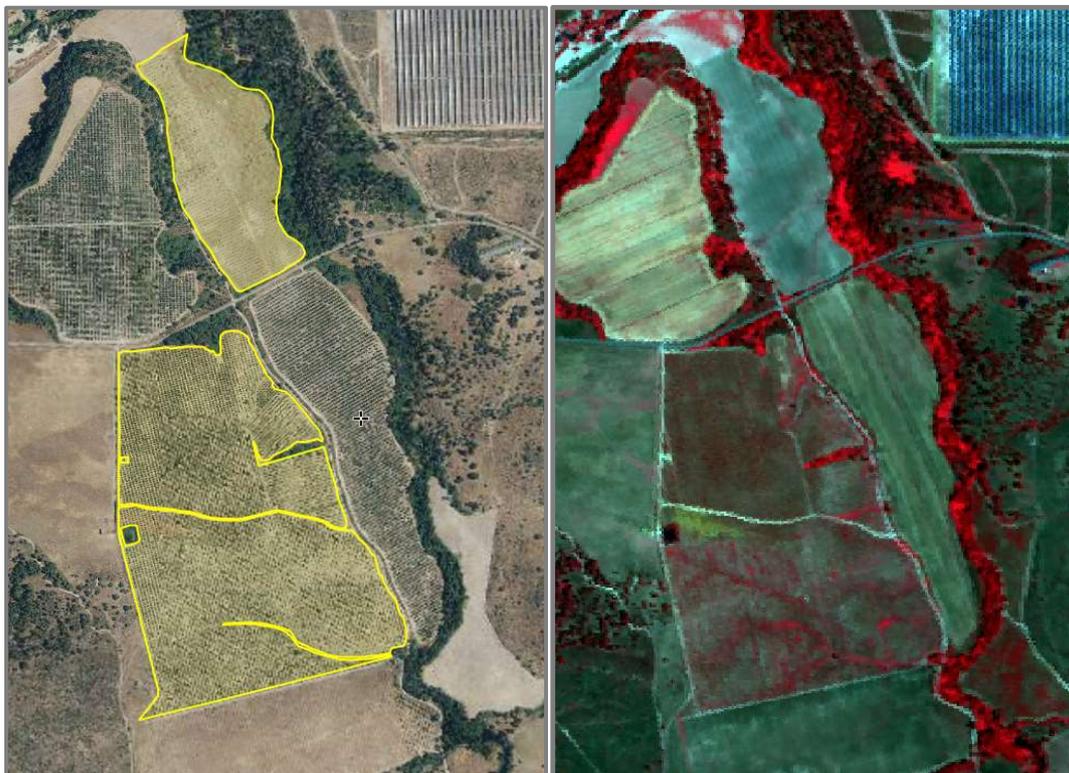


Figura 2.3-b Zona 1 con parcelas de olivos al norte de Majadas de Tiétar (Cáceres), en el área volada durante la campaña DSHSR el 03/07/2015. Izquierda: parcelas según el visor SIGPAC; derecha: imagen AHS con una composición en falso color.



Figura 2.3-c Zona 2 con parcelas de olivos al oeste de Majadas de Tiétar (Cáceres), en el área volada durante la campaña DSHSR el 03/07/2015. Izquierda: parcelas según el visor SIGPAC; derecha: imagen AHS con una composición en falso color.

3 MÉTODOS

Sobre los datos presentados en la sección 2 se han realizado diferentes análisis para evaluar su potencial para simular imágenes de futuras misiones agronómicas, considerando tanto aspectos instrumentales como operacionales.

Los análisis realizados se detallan en los siguientes apartados, especificando si se realizan sobre productos de nivel L1b o L2c.

3.1 Resolución espacial

La resolución espacial nominal está determinada por el IFOV del sensor y la altura de operación. Además de proporcionarse este valor nominal, se ha analizado la variación del GIFOV dentro de un producto imagen. En el caso del AHS, esta variación es debida fundamentalmente al incremento de la distancia sensor-terreno desde el nadir a los bordes de cada línea imagen y a la propia variación de la altura del terreno (la altura de vuelo es constante). Por esto mismo, hay una diferencia importante entre el GIFOV en la dirección de barrido (*cross-track*) y el GIFOV en la dirección de avance (*along track*), que no se ve afectado por el efecto del ángulo dentro del FOV. Hay que advertir que la mayoría de sensores disponibles, basados en sistemas *pushbroom* o *staring*, no utilizan un mecanismo de barrido y no sufren, por tanto, este problema.

Para una descripción más rigurosa de la capacidad de discriminación de información espacial de un sensor, es necesario evaluar la MTF del sistema y hacerlo en condiciones operativas (no en laboratorio). Esto, sin embargo, es complejo, tanto por la dificultad del análisis en sí, como por la influencia de condiciones de vuelo (atmósfera, movimientos de la plataforma) ajenas al instrumento y no necesariamente extrapolables a otros sensores.

En este informe se muestra una estimación de la MTF del sensor AHS, así como su equivalencia en píxeles, estimada a partir de la utilidad disponible en ATCOR4. Esta herramienta utiliza un borde entre dos superficies nítidamente contrastadas para estimar la degradación del contraste efectuada por el sistema sensor más atmósfera. El resultado se muestra como gráfica de MTF para determinadas bandas (en nuestro caso las bandas térmicas del AHS) y la PSF equivalente definida por su ancho en píxeles.

La información del tamaño de píxel en las imágenes L1b, en concreto su GIFOV, se encuentra en ficheros auxiliares, y se puede conocer de manera directa a partir de parámetros del sensor y del vuelo. En los productos L2c, la malla de salida tiene una determinada resolución, que se define de manera que sea cercana al GIFOV pero es necesariamente una solución de compromiso. Por tanto, la verdadera resolución espacial del sensor no puede analizarse en ese producto.



3.2 Ruido (NedT)

El ruido dominante en un producto de teledetección es de origen instrumental y se analiza sobre los datos L1b; el valor obtenido es aplicable a productos de usuario como el nivel L2c.

Para las bandas térmicas del AHS su estimador es la desviación típica de las medidas los cuerpos negros de referencia observados en cada línea de imagen, calculada como la media de los valores de desviación típica obtenidos sobre sucesivos bloques de 50 líneas a lo largo de toda la imagen y transformada a NedT mediante un modelo sencillo.

3.3 Relación Señal/Ruido (SNR)

La SNR informa de la capacidad del sistema de contener información bajo diferentes niveles de señal.

Para este estudio hemos utilizado el valor medio de la radiancia espectral registrada en cada imagen, mientras que el ruido es el calculado anteriormente.

3.4 Rango de temperaturas

El rango de temperaturas ofrece información valiosa para ajustar la cobertura radiométrica de sensores térmicos.

Para este entregable se ha calculado sobre los datos L2c, excluyendo píxeles "no data" que puedan aparecer en la imagen (por ejemplo, si los bordes presentan zonas sin datos). La temperatura mínima corresponde al percentil 0.1 de la distribución de valores de cada imagen y la máxima al percentil 99.9. No utilizamos máximo y mínimo absolutos para evitar artefactos causados por problemas de registro o píxeles con emisividad anómala.

3.5 Efecto de la atmósfera

La atmósfera interfiere con la radiación emitida por la superficie mediante la absorción de parte de esta emisión y mediante la contribución (menor) a la señal medida de la propia radiación térmica atmosférica (término menor excepto en atmósferas húmedas y calientes). La absorción de radiación atmosférica en el rango térmico se debe fundamentalmente al vapor de agua y en menor medida al dióxido de carbono. Hay también una importante absorción por el ozono, pero esta solo afecta a sensores operando a alturas superiores a 20 km.

El efecto de la atmósfera en el nadir se ha estimado comparando la temperatura aparente a la altura de vuelo (3 km) con la obtenida tras la corrección atmosférica. Para ello se ha elegido en cada campaña una zona de interés, centrada en una parcela agrícola, pero sin excluir su entorno. La temperatura aparente se ha obtenido a partir

del dato L1b invirtiendo la ley de Planck para la banda AHS75 y asumiendo una emisividad de 0.98.

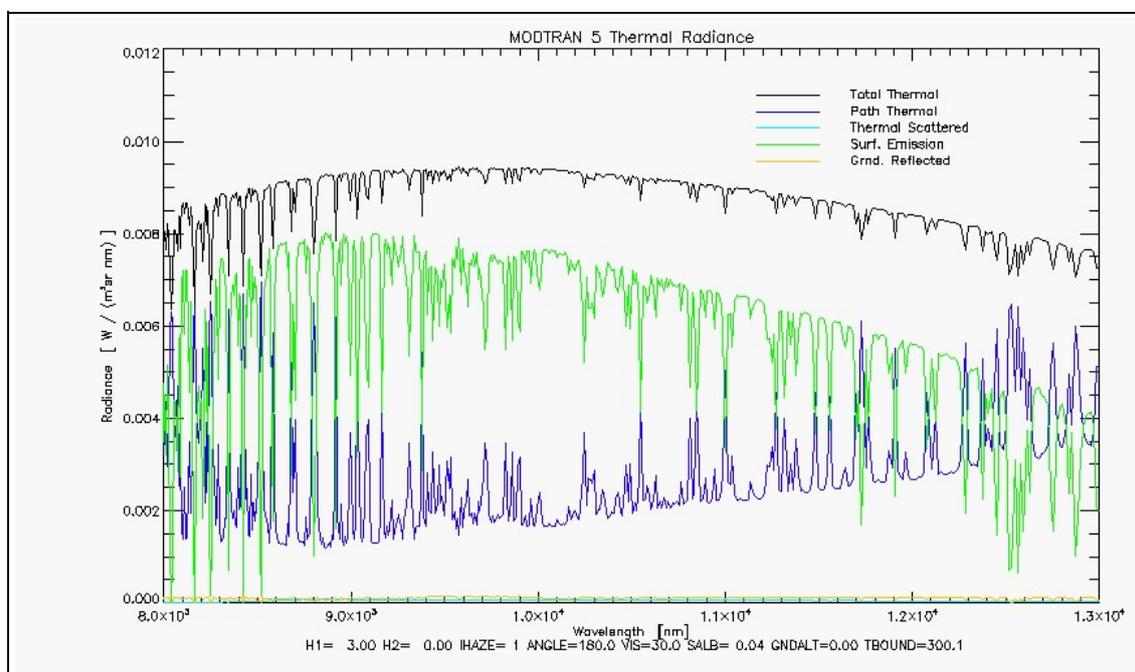


Figura 3.1 Radiancia recibida por un sensor a 3 km de altura desde una superficie a 300 K en condiciones atmosféricas normales. Se aprecian bandas de absorción y la magnitud de la contribución de la emisión propia de la atmósfera (path thermal). Datos y gráfica obtenidos con la herramienta MODO (<https://www.rese-apps.com/software/modo/index.html>).

El efecto de la atmósfera para diferentes ángulos cenitales de observación (OZA) se ha evaluado sobre los productos L1b (donde no ha sido eliminado, y además se mantiene la geometría de adquisición original) en zonas de mar de la campaña IFARE, ya que en estas zonas la variabilidad de la escena observada es mínima y es más fácil apreciar el efecto del OZA sobre la señal. Se ha obtenido el promedio para 4000 líneas imagen de la radiancia registrada por el sensor, y se ha representado frente a la columna imagen asumiendo que el nadir corresponde al píxel central de cada línea.

3.6 Contenido en información de productos L2

Como aportación final, y de cara a acercarnos un poco más a la valoración de las aplicaciones agronómicas de sensores térmicos, se ha estudiado un índice espectral térmico de interés agrícola, el índice de temperatura vegetación-sequedad TVDI (Sandholt et al., 2002). Hay que destacar que este índice requiere el uso simultáneo del NDVI, por lo que requiere datos VNIR y TIR.

El TVDI se ha calculado para diversas imágenes, y en cada una de ellas se han determinado diversos estadísticos descriptivos. Además, se ha calculado el coeficiente de correlación frente a la imagen de temperatura. De esta manera, se quiere visualizar

la información presente en el TVDI que no está presente en la información puramente térmica.

4 RESULTADOS

4.1 Características geométricas

La tabla 4.1 resume los valores de GIFOV para las campañas disponibles en el entregable 14. Los valores completos por imagen se encuentran en el entregable 14.

La figura 4.1 muestra la variación del GIFOV *across-track* y *along-track* en el ancho de la imagen para una imagen de la campaña DHSHR.

Campaña	Escena	GIFOV teórico nadir	GIFOV medio dim. <i>cross-track</i>	GIFOV medio dim. <i>along-track</i>
IFARE17	P02ID	4.6 x 4.6 m	5.9 m	4.7
CEOSS15	P12AD	6.7 x 6.7 m	8.8 m	6.9
DHSHR15	P01I1	4.3 x 4.3 m	5.8 m	4.6
DHSHR16	P01I1	4.4 x 4.4 m	5.9 m	4.7

Tabla 4.1 Resumen de parámetros describiendo la resolución espacial de las imágenes AHS.

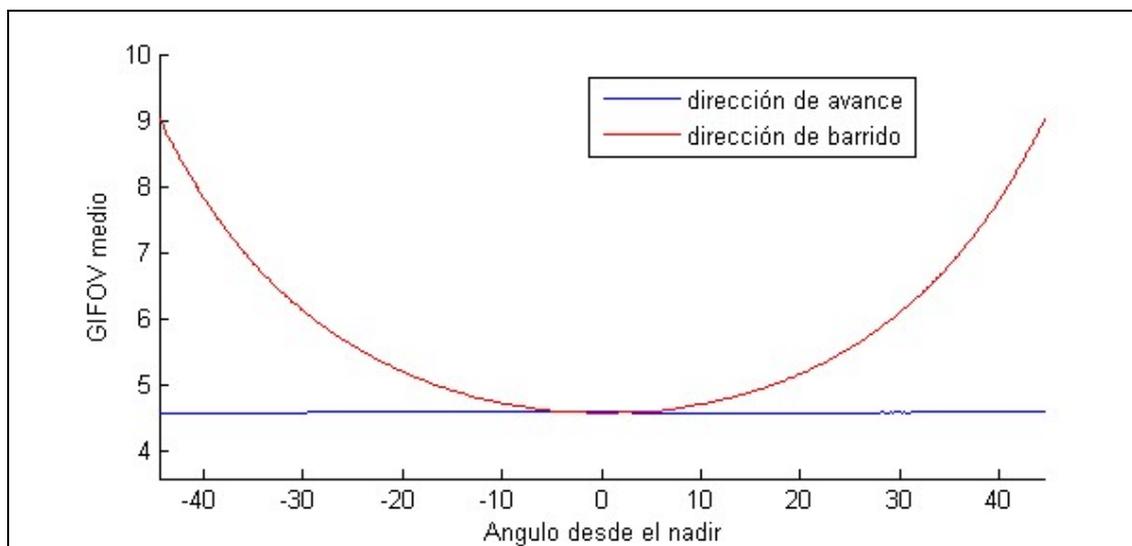


Figura 4.1 Variación del GIFOV *across-track* y *along-track* en el ancho de la imagen para la imagen P01I1 de la campaña DHSHR.



COMPETITIVIDAD

Hay que recordar que este crecimiento del tamaño de píxel desde el centro de la imagen hacia los bordes (en la dirección transversal al avance de la plataforma) es debido al uso de espejo giratorio para la adquisición, y que este efecto no aparece en otras tecnologías de adquisición. Pero precisamente el uso del espejo permite la utilización de un único detector, confiriendo a las imágenes AHS su alto valor de SNR y su óptima calibración.

Por su parte, la figura 4.2 muestra la MTF calculada con ATCOR4 a partir de una transición suelo brillante - agua en una imagen de la campaña IFARE. En la parte inferior izquierda de la figura se aprecia el ancho de la PSF equivalente en píxeles para las bandas térmicas del AHS, situadas en el eje X que indica su longitud de onda en micras. Hay que considerar que la última banda presenta un ruido elevado que impide al algoritmo determinar un valor correcto de PSF.

Como se aprecia, la MTF causa una resolución sobre el terreno efectiva 1.5 veces superior a la nominal.

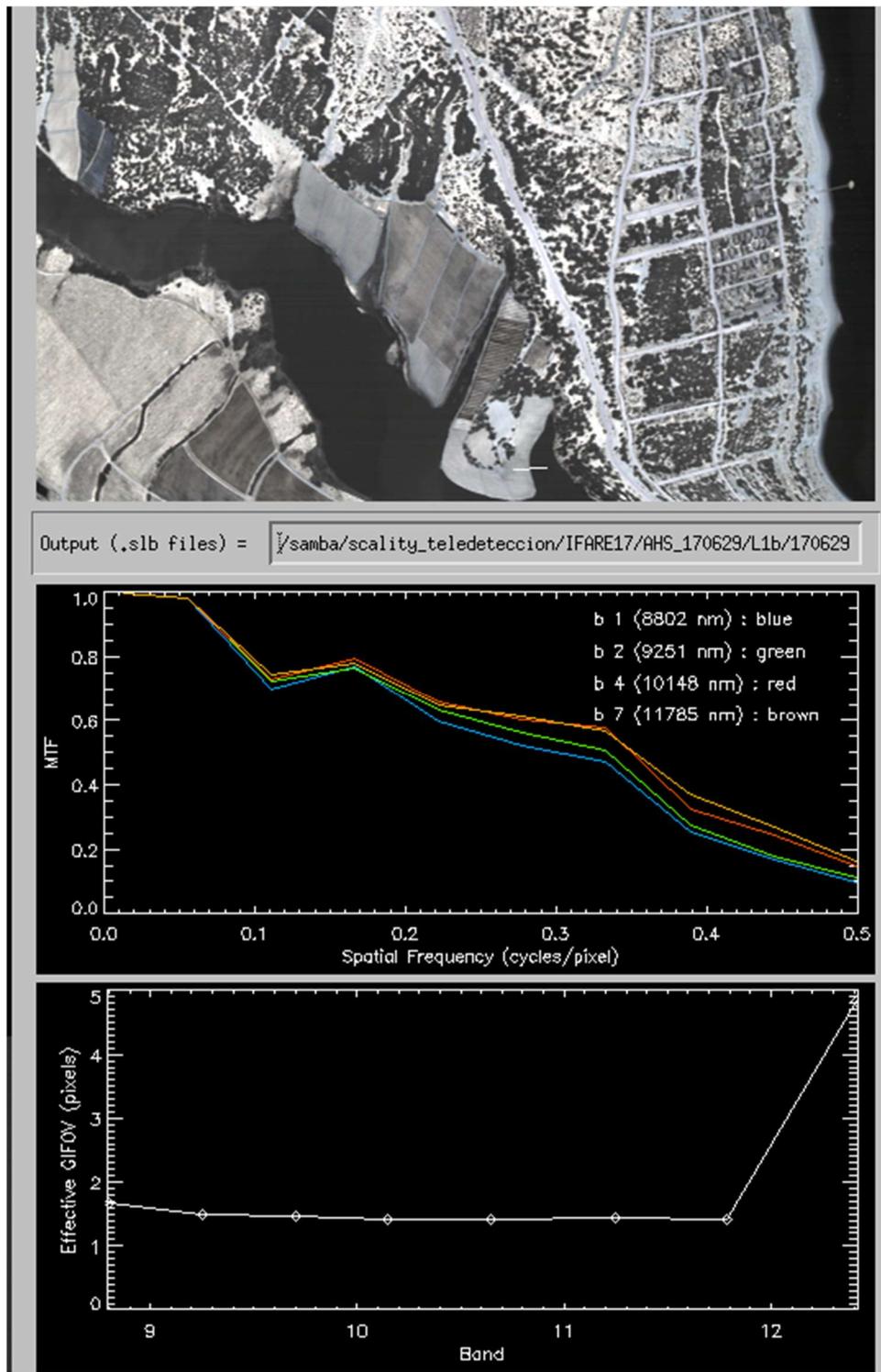


Figura 4.2. Salida del análisis de MTF/PSF realizado por ATCOR4 sobre un transecto arena-agua (visible como un segmento blanco en la parte inferior de la imagen) en datos térmicos AHS de la campaña IFARE17. El eje X de la figura inferior indica la longitud de onda central en micrómetros de cada banda espectral.

4.2 Ruido, SNR, rango térmico

La tabla 4.2 resume los valores de ruido, SNR y rango térmico observado para algunas de las imágenes las campañas disponibles en el entregable 14. Las bandas elegidas para NedT y SNR son AHS75 y AHS78, que corresponden aproximadamente a las bandas térmicas S8 y S9 del sensor SLSTR de la misión Sentinel-3 (ESA, s.f.). Los valores completos por imagen se encuentran en el entregable 14.

Campaña / escena	banda AHS75 (10.2 μm)		banda AHS78 (11.8 μm)		T superficie ($^{\circ}\text{C}$)	
	NedT ($^{\circ}\text{C}$)	SNR	NedT (C)	SNR	T mínima	T máxima
IFARE17 P02ID	0.12	346	0.18	216	18.8	64.2
CEOSS15 P12ID	0.12	327	0.18	213	20.2	55.8
DHSHR15 23/04/15, P0111	0.12	254	0.18	162	16.6	45.8
DHSHR15 23/04/15, P0112	0.12	270	0.18	170	17.1	48.5
DHSHR15 03/07/15, P0111	0.17	239	0.25	153	25.3	59.7
DHSHR15 03/07/15, P0112	0.14	322	0.20	202	26.1	62.7
DHSHR16 03/05/16, P011D	0.13	212	0.20	135	14.6	48.7

Tabla 4.2 Resumen de parámetros describiendo la resolución radiométrica de las imágenes AHS.

Se aprecia que NedT es muy estable en cada banda, y cómo es menor en longitudes de onda más cortas. En cuanto a su valor absoluto, se mantiene por debajo de 0.25°C , lo que garantiza la idoneidad de estos datos para análisis cuantitativos.

4.3 Efecto de la atmósfera

La tabla 4.3 muestra la diferencia entre la temperatura cinética obtenida con ANEM tras corrección atmosférica (T_{ref}) y la temperatura obtenida directamente de la medida del sensor a 3 km ($T_{aparente}$), tanto considerando emisividad 0.975 (como en el valor de referencia) como emisividad 1 (caso básico).

La figura 4.3 muestra la variación de la señal media por columna imagen en la dirección transversal al avance del sensor. Se observa una caída de la señal hacia los bordes, fruto de la mayor interferencia atmosférica, limitada a $<1\%$, junto a un patrón relacionado con la distribución de la temperatura de la superficie del mar en la zona observada (costa de Mazagón).

Campaña	Superficie	Emisividad media	$T_{ref}-T_{aparente}$ para emisividad media	$T_{ref}-T_{aparente}$ para emisividad=1
IFARE17	parcela cítricos	0.975	1.78 °C	3.52 °C
CEOSS15	zona viñedos	0.98	1.25 °C	2.59 °C
DHSHR15 (julio)	zona olivar y ribera del Tiétar	0.971	1.01 °C	2.74 °C

Tabla 4.3. Diferencia entre la mejor estimación de temperatura de la superficie ($T_{referencia}$) y la calculada mediante métodos simplificados ($T_{aparente}$).

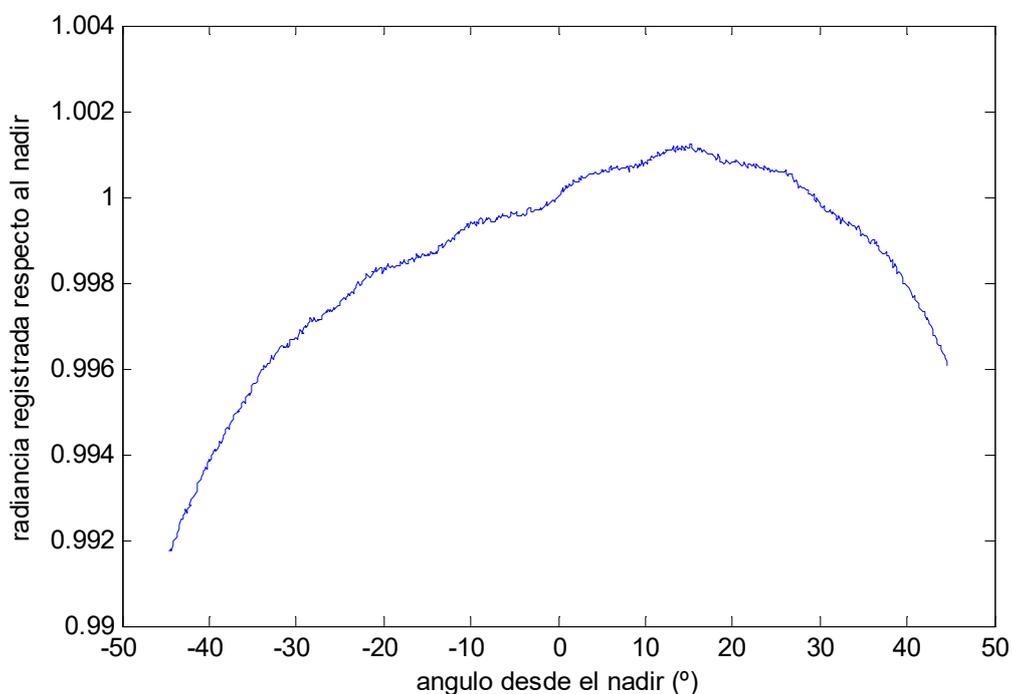


Figura 4.3. Promedio de radiancia registrada por el AHS para cada columna imagen sobre una escena homogénea, mostrando el efecto del camino óptico.

4.4 Información L2

La tabla 4.4 muestra el valor del coeficiente de correlación de Pearson para la correlación entre TVDI y la temperatura para zonas de interés en las imágenes seleccionadas, junto a algunos descriptores del dato TVDI.

Campaña (subzona)	Fecha hora UTC	TVDI [media, desv. estándar]	correlación (TVDI, T) [coef. de correlación, % de varianza en T explicada por TVDI (R ²)]
IFARE17 (parcela de cítricos y entorno)	29/06/17 13:45	[0.42, 0.23]	[0.97, 94%]
CEOSS15 (entorno de Sanlúcar)	11/05/15 11:30	[0.38, 0.25]	[0.86, 74%]
DHSR 15 / 16 (parcela de olivar y entorno)	23/04/15 11:20	[0.50, 0.21]	[0.65, 43%]
	23/04/15 12:32	[0.50, 0.21]	[0.77, 60%]
	7/07/15 10:59	[0.55, 0.25]	[0.93, 87%]
	7/07/15 11:45	[0.54, 0.23]	[0.92, 85%]
	3/05/16 11:27	[0.42, 0.19]	[0.78, 61%]

Tabla 4.4. Resumen de características de las imágenes del índice TVDI para subescenas AHS de interés.

5 DISCUSIÓN

La resolución espacial de las imágenes AHS de las campañas IFARE y DHSR permite la simulación de imágenes obtenidas por sensores térmicos con resolución mayor de 4 m, idealmente de 12 m. Para una simulación totalmente rigurosa, y considerando el efecto de la PSF, este valor sube hasta el rango aproximado [8, 24] m. En el caso de la campaña CEOS, los rangos son aproximadamente un 25% mayores.

La cobertura espacial del conjunto de datos analizado es limitada y no permite el análisis de largas sesiones de vuelo de plataformas HAPS. Este es un problema habitual en la simulación de imágenes de teledetección, que suele solucionarse con el uso de imágenes sintéticas (véase por ejemplo Coppo et al. 2013) para aquellos aspectos en que la cobertura espacial es crítica. Este caso no está contemplado en este entregable.

La resolución radiométrica viene limitada por el ruido del sensor. Los datos AHS mantienen el NedT por debajo de 0.2°C. Además, al tratarse de un ruido blanco y gaussiano, la agregación espacial de N píxeles (que es el procedimiento típico de uso para simulaciones) lo reduce según un factor \sqrt{N} llegando por tanto a valores de SNR superiores a 500:1 que son una base adecuada para estudiar el efecto del ruido de sistemas de observación.

Para analizar la exactitud radiométrica de los datos AHS, la calibración no es problema al realizarse con cuerpos negros de referencia a bordo. Existe un error residual debido a la incertidumbre en la emisividad exacta de estos cuerpos de referencia, pero es menor.



La principal fuente de incertidumbre es, por tanto, la interferencia atmosférica que, a su vez, depende del contenido en vapor de agua. Este, a su vez, depende de la longitud del camino óptico, como se demuestra tanto en la comparación *at-sensor vs ground level* como en la observación de perfiles *across-track*. Hay que destacar que un error del orden del 1% de la señal térmica se traduce, para temperaturas típicas de la vegetación en verano, en errores del orden de 0.5°C.

El vapor de agua influye en la señal recibida. La reducción de señal es significativa y lleva a errores absolutos de más de 1°C en vuelos a 3 km. Extrapolando este resultado a la altura nominal de misiones HAPS, los errores superarán los 2°C, señalando la importancia de una adecuada corrección atmosférica. Para un resultado más preciso se pueden hacer simulaciones con códigos de transferencia radiativa como libRadtran (Emde et al., 2016) o MODTRAN.

El TVDI es un indicador interesante del estado de la superficie. En datos de zonas agrícolas muestra una correlación alta con la temperatura del terreno, pero el valor de los residuos indica que hay una buena parte de variabilidad en el índice de sequedad que no se puede obtener utilizando solamente imágenes térmicas. Es de destacar que la correlación TVDI-T se dispara en imágenes de verano bajo condiciones en las que la falta de agua dificulta el mecanismo de la evapotranspiración.

6 CONCLUSIONES

Las imágenes AHS son adecuadas para simular HAPS por su buena resolución espacial, radiométrica y espectral y por la documentación exhaustiva de sus características.

Un sistema basado en HAPS destinado a proporcionar información de teledetección para aplicaciones agronómicas va a necesitar:

- un sensor con una MTF adecuada, ya que el impacto de esta sobre la resolución espacial es considerable,
- la aplicación de procedimientos de corrección atmosférica, considerando el contenido en vapor de agua de la atmósfera con la mayor exactitud disponible, y el efecto del ángulo de visión para ángulos de observación mayores de 25º,
- unos valores de ruido instrumental adecuados.

El interés de productos como ET y TVDI implica la necesidad de que los sensores incluyan bandas en la región del rojo y del infrarrojo reflectivo (NIR).

7 REFERENCIAS

Coppo, P., Chiarantini, L., Alparone, L. (2013). End-to-End Image Simulator for Optical Imaging Systems: Equations and Simulation Examples, *Advances in Optical Technologies*, vol. 2013, Article ID 295950. doi: 10.1155/2013/295950.

Emde, C., Buras-Schnell, R., Kylling, A., Mayer, B., Gasteiger, J., Hamann, U., Kylling, J., Richter, B., Pause, C., Dowling, T., Bugliaro, L. (2016). The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1). *Geoscientific Model Development*, 9, 1647-1672.

de Miguel, E., Fernández-Renau, A., Prado, E., Jiménez, M., Gutiérrez de la Cámara, O., Linés, C., Gómez, J.A., Martín, A.I., Muñoz, F.. (2014). A review of INTA AHS PAF. *EARSeL eProceedings*, 13(1): 20-29. doi: 10.12760/01-2014-1-03.

Moreno, J., Sabater, N., Vicent, C., Tenjo, C., Alonso, L., Delegido, J., Ruiz-Verdú, A., Verrelst, J., Rivera, J.P. El *End-to-End Mission Performance Simulator* (E2ES) de la misión FLEX: modelización de la señal y cadena de procesamiento de los datos. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Sevilla, España, 01/07/2015.

Richter, R., Schläpfer, D. (2002). Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: Atmospheric/Topographic correction. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13): 2631-2649.

Sandholt, Z., Rasmussen, K., Andersen, J.A. (2002). Simple Interpretation of the Surface Temperature/Vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status. *Remote Sensing of Environment*, 79, 213-224. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00274-7

Schläpfer, D., Richter, R. (2002). Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 1: Parametric Orthorectification. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13): 2609-2630.

Segl, K., Guanter, L., Gascon, F., Kuester, T., Rogass, C., Mielke, C. (2015). S2eteS: An End-to-End Modeling Tool for the Simulation of Sentinel-2 Image Products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 10, pp. 5560-5571. doi: 10.1109/TGRS.2015.2424992.

ESA (sin fecha). Sentinel-3 SLSTR User guide.

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-slstr>

Skoković, D., Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C. (2017). "Vicarious Calibration of the Landsat 7 Thermal Infrared Band and LST Algorithm Validation of the ETM+ Instrument Using Three Global Atmospheric Profiles". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 3, pp. 1804-1811. doi: 10.1109/TGRS.2016.2633810.



Sobrino, J.A., Skoković, D. (2016). Permanent Stations for Calibration/Validation of Thermal Sensors over Spain. *Data.*; 1(2):10. doi: 10.3390/data1020010.

Weiss, M., Jacob, F., Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, Volume 236. doi: 10.1016/j.rse.2019.111402.

