

MONITORIZACIÓN DE INUNDACIONES MEDIANTE RADAR SAR (SENTINEL-1)

FLOOD MONITORING BASED ON THE STUDY OF RADAR SAR (SENTINEL-1)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

**Presentado por:
D^a MARÍA DE MATA MUÑOZ**

**Dirigido por:
Dr. D. FRANCISCO CARREÑO CONDE**

Alcalá de Henares, a 3 de junio de 2019

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quería agradecer a mis padres y mi hermano por su apoyo constante y su amor infinito.

A mi tutor, Francisco Carreño Conde, por su dedicación y tiempo a lo largo de la investigación y desarrollo de este trabajo.

A mis compañeras de máster, ahora amigas. “Las no tan valientes” que resultaron ser las mejores para recorrer este camino, por su ayuda constante y por no dejarme flaquear en los momentos más difíciles.

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	4
3. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA.....	5
3.1. Características de las imágenes RADAR Sentinel-1	5
3.1.1. Parámetros dependientes del sensor RADAR	6
3.1.2. Parámetros dependientes de la superficie a capturar.....	9
3.1.3. Ruido o <i>speckle</i>	11
3.1.4. Distorsiones geométricas y radiométricas	11
3.2. Zona de estudio.....	12
3.3. Preprocesado de las imágenes RADAR Sentinel-1.....	14
3.4. Procesado de imágenes RADAR Sentinel-1	20
3.4.1. Metodología Composición RGB	21
3.4.2. Técnica de Umbrales de calibración.....	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
4.1. Combinación RGB.....	22
4.2. Umbrales de calibración.....	26
4.3. Fotointerpretación con ortofotografía.....	30
5. CONCLUSIONES.....	33
6. ANEXOS.....	35
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Espectro electromagnético que muestra el intervalo de frecuencias y longitudes de onda en el que se dan las microondas. (Tomado de la página web www.mapas.com, 2019).</i>	6
<i>Figura 2. Arriba, representación de la polarización VV (Transmitida y recibida verticalmente). Abajo, representación de la polarización HH (Transmitida y recibida horizontalmente). Adaptado de: NASA's Applied Remote Sensing Training Program, 2017.</i>	8
<i>Figura 3. Diferentes ejemplos de ángulos de incidencia sobre distintas superficies. Adaptado de: NASA's Applied Remote Sensing Training Program, 2017.</i>	9
<i>Figura 4. Mecanismos de retrodispersión. Adaptado de: Podest, 2017.</i>	10
<i>Figura 5. Mapa de ubicación del área de estudio.</i>	13
<i>Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología seguida para el pretratamiento de las imágenes RADAR.</i>	15
<i>Figura 7. Mapa de ubicación de las tres zonas de estudio con la imagen RADAR Sentinel-1 a fecha de 06/04/2018, anterior al evento, con polarización VH sobre el mapa base PNOA máxima actualidad.</i>	16
<i>Figura 8. Mapa de detalle de las tres zonas de estudio con la imagen RADAR Sentinel-1 a fecha de 13/04/2018, posterior al evento, con polarización VH.</i>	17
<i>Figura 9. Mapa de detalle de las tres zonas de estudio con la imagen RADAR Sentinel-1 a fecha de 13/04/2018, posterior al evento, con polarización VV.</i>	17
<i>Figura 10. Imágenes de detalle de una sección de la Zona 3 (Zaragoza – El Burgo de Ebro) a fecha de 13/04/2018, posterior al evento de inundación, con polarización VH en las que se muestra la comparativa entre la imagen sin filtro y el resultado de aplicar distintos filtros de distintos tamaños.</i>	19
<i>Figura 11. Mapa de composición RGB de la Zona 1 (Novillas – Pradilla de Ebro) con filtro Lee tamaño 7x7 (m). Imagen superior con polarización VV e imagen inferior con polarización VH.</i>	23
<i>Figura 12. Mapa de composición RGB de la Zona 2 (Alcalá de Ebro – Torres de Berrellén) con filtro Lee tamaño 7x7 (m). Imagen superior con polarización VV e imagen inferior con polarización VH.</i>	24
<i>Figura 13. Mapa de composición RGB de la Zona 3 (Zaragoza – El Burgo de Ebro) con filtro Lee tamaño 7x7 (m). Imagen superior con polarización VV e imagen</i>	

<i>inferior con polarización VH.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 14. Vistas aéreas de Novillas, Pradilla de Ebro y Boquiñeni (de izquierda a derecha) a fecha de 14 de abril de 2018 en las que se observa la crecida del Ebro y la vegetación característica de ribera altamente inundada. (Fuente: El País, 2018).</i>	<i>26</i>
<i>Figura 15. Representación de los histogramas característicos para la banda con polarización VV y para la VH en la imagen RADAR del 13/04/2018 filtrada con Lee 7x7 (m).</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16. Histograma representativo de las zonas de agua creado a partir de la imagen RADAR del 13/04/2018 con la polarización VH y filtro Lee 7x7.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 17. Mapa de la Zona 1: Novillas – Pradilla de Ebro calculado mediante la metodología de umbrales de calibración, con un límite de intensidad de -21dB. Mapa base PNOA Máxima actualidad.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 18. Mapa representativo únicamente de las zonas de inundación de la Zona 1: Novillas - Pradilla de Ebro. Mapa base PNOA Máxima actualidad.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 19. Ortofotografía de la Ribera Alta a fecha del 14 de abril de 2018. Sistema de coordenadas ETRS1989 UTM Zona 30.</i>	<i>31</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Características generales del sensor y de las imágenes RADAR obtenidas por Sentinel-1. Adaptado de: NASA´s Applied Remote Sensing Training Program, 2017.</i>	<i>3</i>
<i>Tabla 2. Bandas más utilizadas en los sensores RADAR con sus características principales y sus aplicaciones habituales. Adaptado de: NASA´s Applied Remote Sensing Training Program, 2017.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 3. Relación entre los valores de dispersión y las características de la superficie.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 4. Valores representativos sobre los niveles y caudales anuales del río Ebro en diferentes estaciones ubicadas en su curso para el año 2018. Datos históricos tomados del SAIH de la CHE, 2019.</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 5. Características de las imágenes RADAR del Sentinel-1 utilizadas en el estudio.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 6. Valores de superficie inundada en la Ribera Alta.....</i>	<i>32</i>

TABLA DE ABREVIATURAS

CE: Comisión Europea.

CHE: Confederación Hidrográfica del Ebro.

ESA: European Space Agency.

GMES: Global Monitoring for Environment and Security.

GRD: Ground Range Detection.

INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

IW: Interferometric Wide Swath.

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

ND: Niveles Digitales.

RADAR: Radio Detection and Ranging.

RGB: Red – Green – Blue.

SAIH: Sistema Automático de Información Hidrológica.

SAR: Synthetic Aperture Radar.

SNAP: Sentinel Application Platform.

SPOT: Satellite Pour l'Observation de la Terre.

UTM: Universal Transverse Mercator.

RESUMEN

La cuenca del Ebro es objeto de periódicas crecidas debido, principalmente, a eventos de intensas lluvias y al deshielo. Este estudio se centra en las inundaciones de mediados de abril de 2018 en un área que abarca desde la población de Novillas hasta El Burgo de Ebro, en la provincia de Zaragoza. Para ello, se han utilizado imágenes RADAR del sensor Sentinel-1 como herramienta para delimitar la extensión de la inundación. Dadas las particulares características que poseen los sensores SAR, que pueden actuar bajo circunstancias adversas de luz y en todo tipo de condiciones climáticas, obtenemos imágenes con una correcta resolución espacial y temporal para llevar a cabo el análisis. Es necesario un pretratamiento para reducir el *speckle*, que dificulta la interpretación de las imágenes y reduce la calidad de las mismas, utilizando filtros que conservan la textura y suavizan los límites. A continuación, con imágenes anteriores y posteriores al evento se han generado mapas de inundación para las polarizaciones VV y VH mediante dos metodologías distintas: composición RGB y umbrales de calibración. A pesar de las limitaciones, los resultados obtenidos confirman la idoneidad de las imágenes RADAR para cartografiar inundaciones, especialmente con la polarización VH.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son eventos que se producen con bastante frecuencia, de manera torrencial y posiblemente influenciados, según los últimos estudios, por el cambio climático. Estudiando eventos pasados y aquellos que han sucedido más recientemente se pueden estimar modelos de comportamiento hidrológico que pueden ayudar a diseñar planes de actuación y mejora, así como, tomar medidas previas a la ocurrencia para que su impacto sea el menor posible.

Dependiendo del objetivo final del estudio de inundación, y de los medios de los que se dispongan, se pueden aplicar numerosas técnicas o metodologías. En este trabajo se expone cómo a través de la teledetección se puede desarrollar un monitoreo de áreas inundadas utilizando imágenes RADAR (*Radio Detection and Ranging*).

La teledetección, traducción del término *remote sensing*, es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales asumiendo que entre la superficie y el sensor hay un intercambio de energía, activa si la emisión es por parte del sensor, o pasiva, si es a través de la energía solar (Chuvieco, 2008). En particular, la tecnología RADAR se lleva desarrollando desde los años 60 con fines militares, pero no es hasta los años 80 que se empieza a utilizar para el estudio de inundaciones.

Copernicus, anteriormente llamado Programa para la Vigilancia Mundial del Medio Ambiente y la Seguridad (GMES), es un programa de observación de la tierra capitaneado por la Comisión Europea (CE) y la Agencia Espacial Europea (ESA). A él pertenece la gama de satélites Sentinel desarrollados principalmente para optimizar la correcta gestión del medio ambiente, entender cómo los efectos del cambio climático afectan al entorno y aportar nuevas alternativas de protección a la población frente a fenómenos extremos. Hasta la actualidad, son cinco las misiones que conforman el programa, del Sentinel-1 hasta el Sentinel-5. Las imágenes RADAR que han sido utilizadas en el estudio pertenecen al Sentinel-1, primera misión espacial del proyecto Copernicus, y que está compuesto por dos sensores, A y B. En la Tabla 1 se muestran las características principales que poseen los

sensores y algunas de las particularidades que tienen las imágenes obtenidas con los mismos.

Tabla 1. Características generales del sensor y de las imágenes RADAR obtenidas por Sentinel-1. Adaptado de: NASA's Applied Remote Sensing Training Program, 2017.

Plataforma	Sentinel-1
Agencia	Agencia Espacial Europea (ESA)
Sensor/Instrumento	C – band SAR (5.4GHz)
Ángulo de incidencia	Visión lateral, 15 – 45° desviado del nadir
Polarización	VV y VH o HH y HV
Resolución espacial	5 (Ground range) x 20 (Azimuth) m
Revisita (Ciclo de repetición orbital)	12días
Área de barrido	250km (IWS Mode)
Altura del sensor en el Ecuador	693km
Órbita	Heliosincrónica (anochecer/amanecer)
Lanzamiento Sentinel-1A	3 de abril de 2014
Lanzamiento Sentinel-1B	25 de abril de 2016
Vida útil programada	7 años

El poder disponer de estas imágenes de satélite de alta resolución de manera inmediata, de cualquier parte del mundo, a tiempo real y de forma gratuita, es una valiosa fuente de información que permite, a través del estudio de una secuencia multitemporal de las mismas, detectar cambios y alteraciones en una determinada área de estudio mediante su comparación.

Las imágenes RADAR requieren de un procesado, tratamiento y, posterior, análisis, pero a partir del cual, se alcanzan buenos resultados en su aplicación a las inundaciones como se comprobará en el desarrollo de este trabajo.

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El río Ebro es el más caudaloso de la Península Ibérica, uno de los más importantes de la cuenca Mediterránea y que anualmente sufre importantes eventos de crecida y desbordamiento. El área de estudio, centrada en el tramo medio del Ebro, es característica porque su pendiente media es muy suave, tiene un alto índice de sinuosidad con una morfología meandriforme y una amplia llanura aluvial que la define (Sánchez Fabre et *al.*, 2015). Por ello, se hace propicio este lugar para la aplicación de técnicas, metodologías o estudios destinados a conocer el comportamiento hidrológico y la dinámica cambiante del río, así como comprender cómo influyen las constantes avenidas para las poblaciones que se encuentran muy próximas a su ribera.

Hay gran cantidad de bibliografía publicada con respecto al río Ebro y al estudio de sus periódicos desbordamientos, pero ninguna en la que se hayan utilizado las imágenes de satélite RADAR para su cálculo o delimitación. Por ello, un análisis realizado con las diferentes metodologías que nos aporta este tipo de imágenes sería un complemento adicional adecuado para comparar o aportar nuevos resultados a los ya obtenidos con otro tipo de datos.

El trabajo que aquí se expone tiene como principal objetivo la delimitación de las áreas de inundación de una parte del río Ebro en su curso medio durante una crecida de carácter extraordinario, que sucedió a mediados de abril de 2018, mediante la utilización de imágenes RADAR SAR. La idoneidad de este tipo de imágenes para fines cartográficos se verá determinada con los resultados obtenidos en el estudio.

3. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

Dadas las particularidades de las imágenes RADAR SAR es necesario tener un conocimiento teórico tanto de la captación de las imágenes como el resultado obtenido para favorecer un correcto análisis posterior. En los siguientes puntos se explican cuáles son los factores que determinan la imagen captada.

3.1. Características de las imágenes RADAR Sentinel-1

Bajo las correctas condiciones atmosféricas los sensores ópticos, tales como Landsat o SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre), aportan una información directa más fácilmente interpretable de la situación sin tener la necesidad de realizar gran cantidad de procesos de tratamiento. Pero como habitualmente, esto no es así, y los fenómenos de inundación se dan bajo periodos de alta precipitación y gran nubosidad, hacer un estudio multitemporal del evento con sensores ópticos no aportaría la información requerida. De ahí que, los mejores resultados para la detección de grandes cursos de agua permanentes y de extensas zonas de vegetación inundadas se hayan obtenido mediante el uso de la información que aportan los RADAR de Apertura Sintética (SAR) (Chapman et al., 2015).

Son varios los factores que influyen en la intensidad de la imagen, o más concretamente, en la magnitud de coeficiente de retrodispersión (término en inglés, *backscattering coefficient*, σ). Es un efecto combinado de, por un lado, las características del radar: la longitud de onda, la polarización y el ángulo de incidencia y, por otro lado, las características propias de las áreas a captar: la constante dieléctrica, su mayor o menor grado de aspereza y cómo están situados y distribuidos sobre la superficie los objetos (Bhagat et al., 2017). La unidad de medida de la intensidad de retrodispersión es el decibelio (dB) y normalmente, su intervalo de valores oscila entre -25dB, en zonas con baja retrodispersión y 1dB en zonas con alta retrodispersión.

Sabiendo cómo influyen estas características en el resultado final de la imagen, y necesitando conocerlas para extraer la máxima de información de ellas, se describen a continuación.

3.1.1. Parámetros dependientes del sensor RADAR

El sistema Sentinel-1 lleva a bordo una antena que emite la señal lateralmente, en dirección a la superficie terrestre, en forma de microondas (Figura 1). Las microondas poseen longitudes de onda que van desde 0.3 a 300cm. Dada la longitud de las mismas pueden atravesar las nubes, la niebla, el humo e incluso, la vegetación o el suelo y en situaciones de total ausencia de luz solar. Esta característica hace que sean las adecuadas para captar las imágenes bajo las condiciones meteorológicas en que se dan los fenómenos de inundación. Cabe decir que al atravesar las nubes se generan pequeñas distorsiones en la entrada y en la salida, pero no generan una barrera opaca como sucede con las imágenes ópticas que imposibilitarían su correcto análisis y estudio.

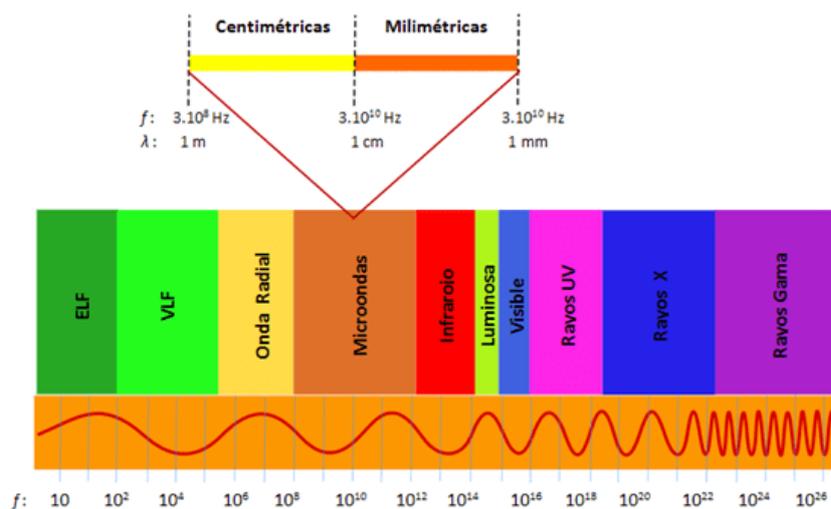


Figura 1. Espectro electromagnético que muestra el intervalo de frecuencias y longitudes de onda en el que se dan las microondas. (Tomado de la página web www.mapas.com, 2019).

Los sensores habituales de captación emiten en longitudes de onda que oscilan entre 2.4 y 30cm. Dentro de este intervalo se pueden diferenciar distintas bandas como se muestra en la Tabla 2. La longitud de onda es directamente proporcional a la penetración a través de la vegetación o del suelo en estado seco. Esto quiere decir que un sensor que trabaje en la Banda L, con una longitud de onda entre 15 y 30cm, será capaz de captar información a mayor profundidad que un sensor con banda X o C, por ejemplo.

El sensor que lleva a bordo el Sentinel-1 funciona en la banda C y emite señal con

una frecuencia de 5.4GHz. A pesar de que con esta frecuencia la penetración a través de la vegetación arbórea de gran altura es baja, el ser superior a la que tendría la Banda L, por ejemplo, hace que tenga mayor resolución con una antena más corta.

Tabla 2. Bandas más utilizadas en los sensores RADAR con sus características principales y sus aplicaciones habituales. Adaptado de: NASA's Applied Remote Sensing Training Program, 2017.

Designación	Longitud de onda, λ en cm	Frecuencia, f en GHz	Ejemplo de aplicación
X	2.4 – 3.8	12.5 – 8	Civil, militar, meteorología
C	3.8 – 7.5	8 – 4	Estudio del océano, agricultura, cambios en la superficie terrestre
S	7.5 – 15	4 – 2	Meteorología
L	15 – 30	2 – 1	Agricultura, humedad del suelo, forestal

Es necesario que los satélites RADAR orbiten lo más cerca posible de la superficie, y en el caso de Sentinel-1 lo hace a 693km, para que el haz de microondas pierda la menor intensidad posible a pesar, de que ello conlleve un mayor rozamiento atmosférico (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA, 2017).

Además de la longitud de onda como parámetro característico del sensor RADAR hay que tener en cuenta para el estudio, la polarización y el ángulo de incidencia. La variabilidad de estos factores va a influir en la información que vamos a obtener de la superficie de captación.

La polarización viene definida como la dirección de propagación de la onda perpendicular a la dirección del campo eléctrico. En el caso de los sensores Sentinel-1 tienen unas antenas configuradas para transmitir la energía y recibir la radiación electromagnética polarizada tanto horizontal como verticalmente (Figura 2). Las imágenes obtenidas nos aportan doble polarización, VV y VH. La proporción de señal que vuelve al sensor es dependiente de la polarización y de las características físicas de la superficie captada. Normalmente, los polos cruzados, VH o HV, tienen menor penetración en la superficie que los polos iguales, HH o VV (National Aeronautics and Space Administration, NASA, 2016).

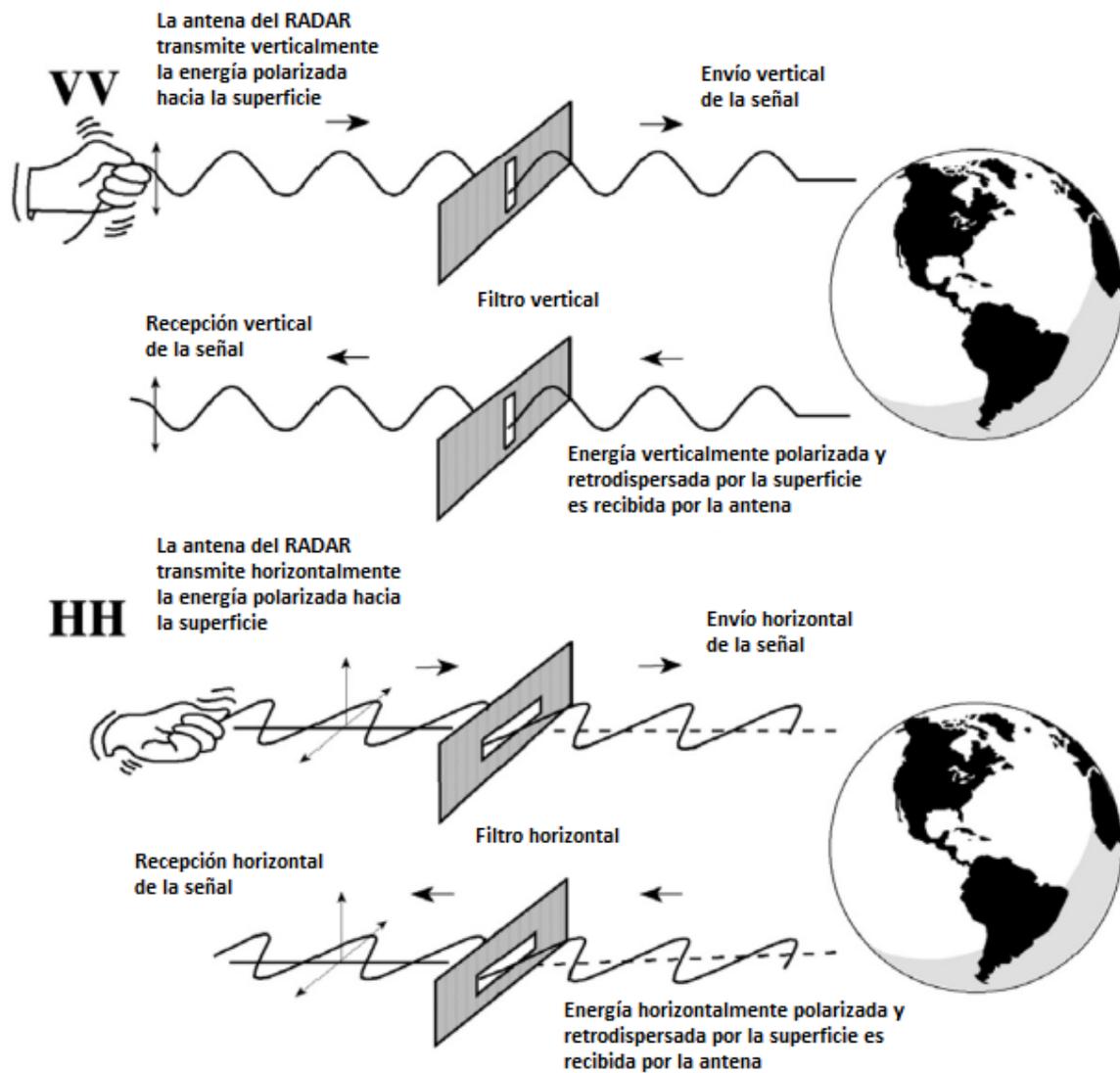


Figura 2. Arriba, representación de la polarización VV (Transmitida y recibida verticalmente). Abajo, representación de la polarización HH (Transmitida y recibida horizontalmente). Adaptado de: NASA's Applied Remote Sensing Training Program, 2017.

El ángulo de incidencia del haz de ondas electromagnéticas es el que forma la dirección de emisión del radar con la vertical sobre la superficie del terreno (Figura 3). Es dependiente de la altura a la que se encuentre el sensor y de la geometría del área a captar, de ahí que influya en la intensidad del pixel y en la interpretación por cambios relativos a la luminosidad (Chapman et al., 2015). Por lo general, con ángulos de incidencia pequeños la señal devuelta al sensor es elevada, a medida que se va aumentando el ángulo se reduce la energía captada de nuevo por el sensor. Es un factor muy a tener en cuenta en zonas con variabilidad de pendiente.

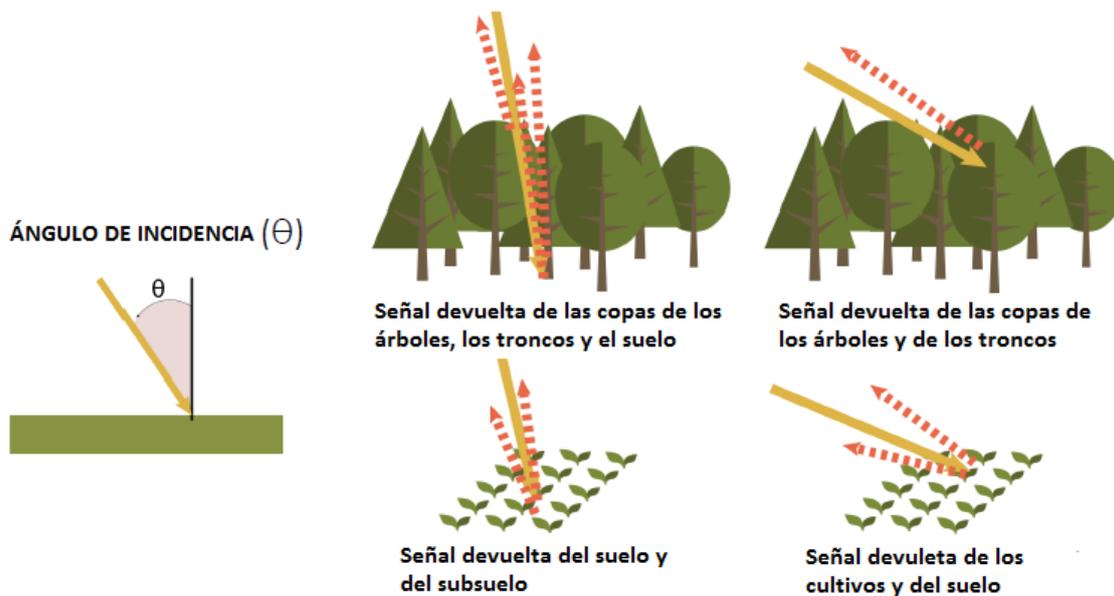


Figura 3. Diferentes ejemplos de ángulos de incidencia sobre distintas superficies. Adaptado de: NASA's Applied Remote Sensing Training Program, 2017.

3.1.2. Parámetros dependientes de la superficie a capturar

La constante dieléctrica es una propiedad de los materiales que indica la reflectividad y conductividad de los mismos. Los objetos presentes sobre la superficie terrestre, en estado seco, tienen valores que oscilan entre los 2 y 10 mientras que el agua puede llegar hasta los 80. A mayor constante dieléctrica, mayor es la reflectancia del objeto y queda limitada la interacción energía y terreno a la zona superficial. Esto quiere decir que la penetración de las ondas en áreas húmedas es inferior que en las zonas secas.

La señal reflejada, o eco, es retrodispersada por la superficie y recibida en parte por la antena. El brillo, o amplitud, así como la fase son medidos y usados para construir la imagen en los sistemas SAR, como es el caso en los Sentinel-1 (ESA, 2007). Entendiendo que cada pixel representado en la imagen es la cantidad de energía que se ha reflejado de vuelta al sensor, se pueden reducir a cuatro las posibilidades de esa retrodispersión de las ondas electromagnéticas y que se muestran en la Figura 4.

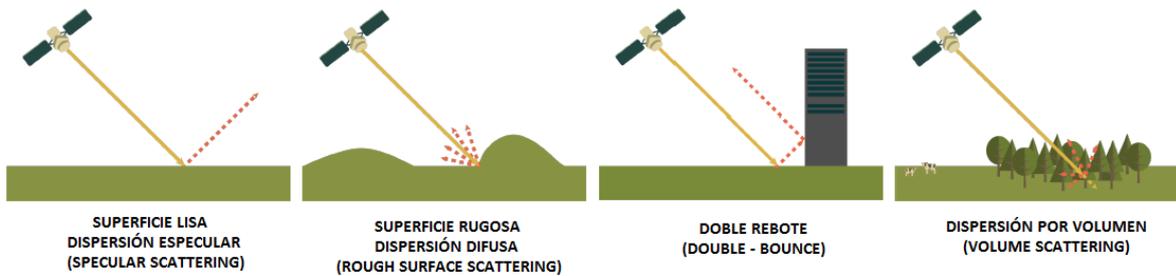


Figura 4. Mecanismos de retrodispersión. Adaptado de: Podest, 2017.

El efecto espejo (o *specular reflection* en inglés) es característica de superficies planas con escasa rugosidad. Las microondas al incidir sobre ellas generan un reflejo especular emitiendo de vuelta la onda lejos del radar. La señal devuelta es mínima, de ahí que los valores de retrodispersión sean muy bajos, normalmente inferiores a -20 decibelios. Es típica de superficies de agua abiertas tales como lagos o ríos y la que va a representar mayoritariamente las zonas inundadas del estudio.

La dispersión difusa (o *rough surface scattering* en inglés) es típica de zonas rugosas, en las que la energía es redirigida en varias direcciones y parte de ella devuelta hacia el sensor. Se da mayoritariamente en zonas de cultivos agrícolas o zonas deforestadas.

El efecto doble rebote (o *double-bounce* en inglés) se da en zonas urbanas en las que la onda incide sobre el suelo y choca con los edificios, formando un ángulo recto, devolviendo la onda de vuelta al sensor en una elevada proporción. También, es típica de áreas inundadas con vegetación arbórea o de ribera, en el que la onda tras reflejarse sobre la superficie inundada choca con el tronco o las ramas devolviendo gran cantidad de señal al sensor.

Para finalizar, la dispersión por volumen (o *volumen scattering* en inglés) es la producida por el choque de la onda directamente con la vegetación en altura dando tonalidades de grises en un amplio espectro. Esto se debe a la heterogeneidad de la superficie de choque que redirige la señal en muchas direcciones.

La relación entre el tipo dispersión y los valores de intensidad de retrodispersión en función de las características propias del terreno capturado se muestran en la Tabla 3, a tener en cuenta a la hora de realizar el análisis de las imágenes RADAR.

Tabla 3. Relación entre los valores de dispersión y las características de la superficie.

Tipo de dispersión	Intervalo de intensidad	Características
Dispersión muy elevada	Superior a -5dB	Pendientes del terreno orientadas hacia el sensor y haz incidiendo de forma ortogonal. Superficies muy rugosas, zonas boscosas inundadas y/o zonas urbanas.
Dispersión elevada	Entre -10 y -5dB	Superficies rugosas y vegetación densa.
Dispersión moderada	Entre -20 y -10dB	Superficie parcialmente rugosa con vegetación moderada.
Dispersión baja	Inferior a -20dB	Pendientes del terreno no orientadas hacia el sensor. Superficies lisas y/o materiales muy secos.

3.1.3. Ruido o *speckle*

Las imágenes RADAR obtenidas con los sensores Sentinel-1 son completamente diferentes a las ópticas. Son imágenes en tonos grises con aspecto granular, también denominado “*sal y pimienta*”, *speckle* o ruido que requieren de una serie de tratamientos para su correcta interpretación. El ruido se debe a oscilaciones aleatorias de la señal devuelta al sensor debido a la interacción de la onda emitida con las superficies rugosas del terreno.

Los tratamientos de reducción del ruido son, mayoritariamente, modelos estadísticos cuyo objetivo principal es conseguir un suavizado de los límites de las distintas formas representadas evitando la pérdida de detalles de la imagen. En el apartado de preprocesado de las imágenes se describen los filtros disponibles en el programa SNAP (*Sentinel Application Platform*), con el que se han procesado las imágenes, y que se han utilizado en el estudio para reducir el problema del ruido.

3.1.4. Distorsiones geométricas y radiométricas

Debido a la emisión de ondas de captación por parte del sensor en una dirección lateral produce una serie de distorsiones geométricas que son necesarias conocer

y corregir. Una de ellas es, la distorsión por distancia oblicua (*slant range distortion*, en inglés) que genera zonas más comprimidas en la imagen en las áreas de captación más cercanas al sensor y más amplias en las más alejadas. Ello nos lleva a resultados no reales de distancia en la imagen. Otras distorsiones son: inversión por relieve (*layover*, en inglés), desplazamiento de estructuras (*foreshortening*, en inglés) y la generación de sombras; dándose estos casos, principalmente, en zonas con pendientes abruptas.

Las distorsiones radiométricas son debidas a la diferencia de emisión de energía por parte de la antena del sensor entre la parte central de la imagen y los laterales. De esta forma, se generan zonas más brillantes allá donde la incidencia de la energía del sensor es mayor, en el medio de la imagen, y más oscuras donde es menor, en los extremos. También está condicionada por la orientación del sensor con respecto a las zonas elevadas o el ángulo de incidencia (Podest, 2017).

3.2. Zona de estudio

El área de estudio se centra en la cuenca media del río Ebro en la demarcación hidrográfica del mismo nombre desde la población de Novillas hasta El Burgo de Ebro, todo el tramo dentro de la provincia de Zaragoza (Figura 5). Aproximadamente, entre las coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) de X: 633454 (m) Y: 4644368 (m) y X: 694941 (m) Y: 4604802 (m).

El tramo medio del río Ebro se caracteriza por sus meandros, tener un fondo de valle plano y amplias llanuras de inundación. En sus riberas predominan los cultivos de regadío como el trigo, la alfalfa, el maíz, la cebada o el arroz y entre los cultivos leñosos destacan, entre otros, los viñedos, los olivos y los manzanos (Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE, 2019).

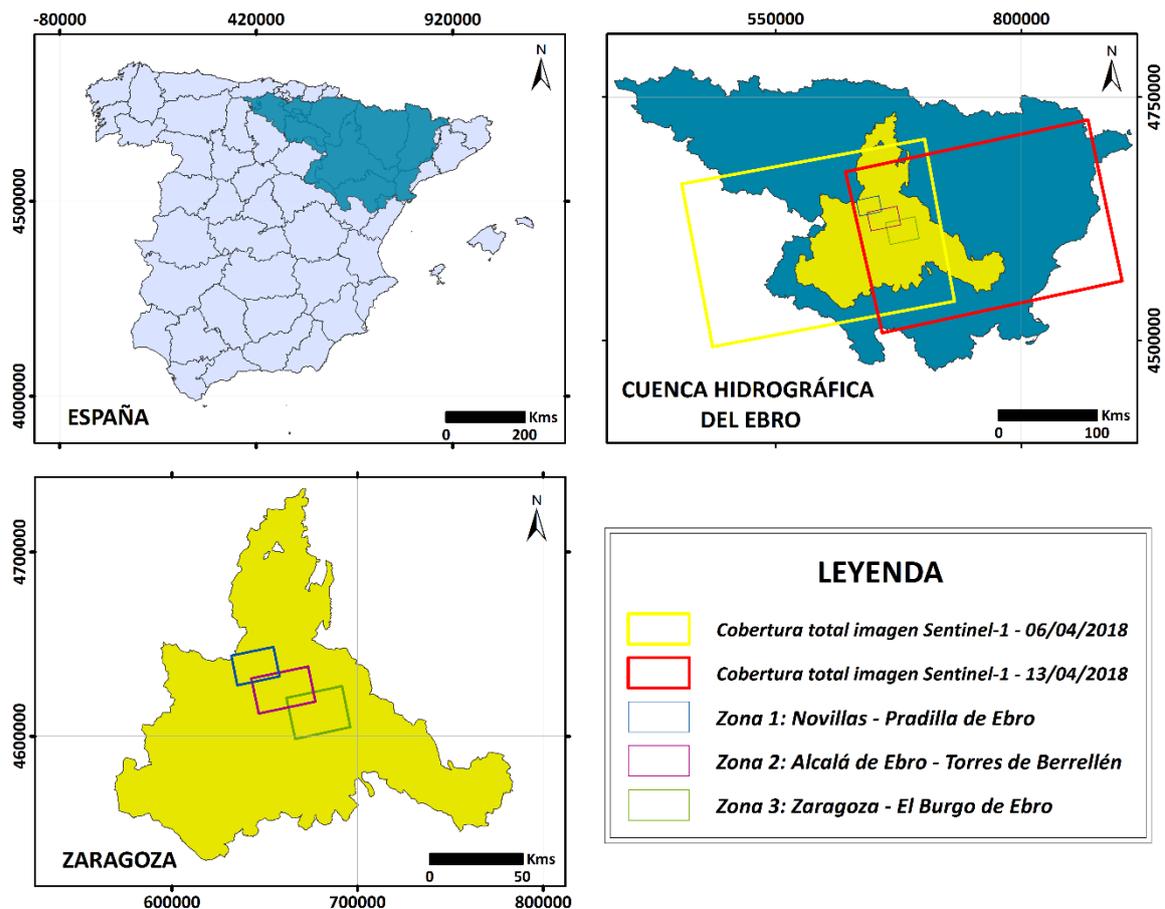


Figura 5. Mapa de ubicación del área de estudio.

El estudio de las grandes crecidas históricas del Ebro, como las acontecidas en 1643, 1775, 1871 ó 1961, y otras más recientes como las de 2003 ó 2015, aporta información sobre la dinámica cambiante del curso y de cómo el Ebro ha tratado de consolidarse en la zona inundable encontrándose con barreras creadas por el hombre para evitar que eso ocurriera (Galván Plaza, 2018). El río Ebro es uno de los más regulados de la Península Ibérica y de los que sufren inundaciones periódicamente (Pueyo et al., 2016). Más recientemente, en 2015, se produjo otra gran crecida que fue controlada gracias a una correcta gestión en los embalses de la cuenca y a los datos aportados por los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) dejando valores de caudales máximos superiores a la inundación de abril de 2018 objeto de este estudio, así como, campos de cultivo y explotaciones ganaderas totalmente anegadas.

En la Tabla 4, representativa del año 2018, se muestran los valores recogidos en

las estaciones desde Castejón (Navarra) hasta Zaragoza y que muestran cómo evolucionó la crecida desde el día 13 hasta el 15 de abril, obteniéndose el máximo nivel anual de acumulación en Presa Pina, por debajo de la población de El Burgo de Ebro, el día 15 de abril a las 21.30 horas con 6.03m, habiendo tenido un nivel medio anual de 4.48m (SAIH de la CHE, 2019).

Tabla 4. Valores representativos sobre los niveles y caudales anuales del río Ebro en diferentes estaciones ubicadas en su curso para el año 2018. Datos históricos tomados del SAIH de la CHE, 2019.

Estación	Día	Hora	Nivel medio anual del Ebro (m)	Nivel máximo anual del Ebro (m)	Caudal medio anual del Ebro (m ³ /s)	Caudal máximo anual del Ebro (m ³ /s)
Castejón	13/04/2018	9.30	2.82	7.77	265	2682
Tudela	14/04/2018	01.00	1.22	5.34	270	2413
Novillas	14/04/2018	11.45	2.63	8.24	-	-
Pradilla de Ebro	14/04/2018	20.30	3.11	8.51	-	-
Alagón	16/12/2018	07.30	0.88	2.26	-	-
Zaragoza – Ronda Norte	15/04/2018	17.15	2.61	8.02	-	2041
Zaragoza	15/04/2018	19.45	1.5	5.36	288.52	2037

Las limitaciones temporales de captación de imágenes de los sensores RADAR Sentinel-1 hacen que no tengamos imágenes del día de máximo nivel del Ebro en los puntos de estudio. La imagen disponible más cercana al momento de máxima crecida que nos ofrece la ESA es a fecha del 13 de abril de 2018 a las 17.55 horas, y ha sido la que se ha utilizado para el desarrollo del estudio.

3.3. Preprocesado de las imágenes RADAR Sentinel-1

Con el software gratuito SNAP Tool versión 6.0.0., creado específicamente por la ESA para el análisis de las imágenes captadas por los satélites Sentinel, han sido tratadas las imágenes. A pesar de ser de libre acceso es un programa muy potente que posee las herramientas adecuadas (*Sentinel Toolboxes*) para realizar un tratamiento preciso y exhaustivo de las imágenes y ejecutar posteriormente su análisis. En la Figura 6, se muestra la secuencia de los pasos seguidos para el pretratamiento de las imágenes:

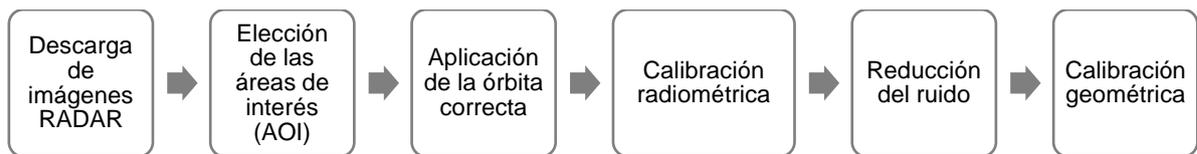


Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología seguida para el pretratamiento de las imágenes RADAR.

Las imágenes para el estudio comparativo, anterior y durante el evento, han sido descargadas, mediante registro previo, a través de la plataforma Copernicus Open Access Hub (ESA, 2018). Cada una de ellas tiene una franja de cobertura de 250 kilómetros, son del tipo GRD (*Ground Range Detection*), fueron captadas en modo IW (*Interferometric Wide Swath*) y tienen una alta resolución (*High Resolution*). El nivel de procesado es 1, que indica que han sido proyectadas usando un modelo elipsoidal de la Tierra y la pasada del sensor es ascendente. A su vez, poseen doble polarización, VV y VH, que facilita la comparación en el estudio de inundaciones como posteriormente se verá. En la Tabla 5 se muestran otras características particulares de cada una de ellas.

Tabla 5. Características de las imágenes RADAR del Sentinel-1 utilizadas en el estudio.

Imagen	Identificador de la misión	Fecha de captura	Hora de captura
A	Sentinel-1A	6 de abril de 2018	18.03
B	Sentinel-1B	13 de abril de 2018	17.55

De las imágenes, se han escogido tres áreas de interés en base a las poblaciones más importantes de las zonas delimitadas, que siguen el curso del río Ebro desde la población de Novillas hasta El Burgo de Ebro. Son Zona 1: Novillas – Pradilla de Ebro, Zona 2: Alcalá de Ebro – Torres de Berrellén y Zona 3: Zaragoza – El Burgo de Ebro, tal y como se muestra en la Figura 7. Esta subdivisión, además de crear una continuidad en el estudio, favorece la correcta manipulación de las imágenes para su pretratamiento, así como, la reducción del tiempo en el procesamiento de las mismas.

En la Figura 7, la imagen RADAR que se muestra se le ha aplicado la órbita correcta y se han hecho las correcciones radiométricas y geométricas precisas, sin filtros y en el Sistema de Coordenadas ETRS 1989 UTM Zona 30.

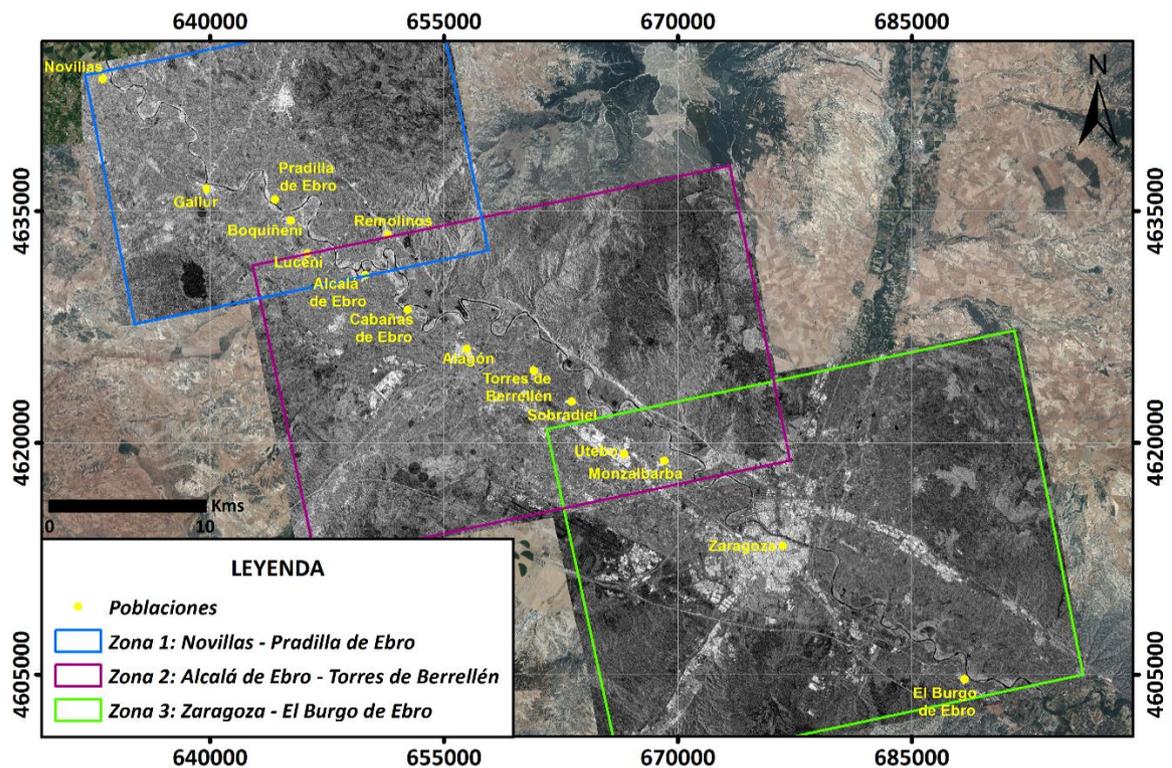


Figura 7. Mapa de ubicación de las tres zonas de estudio con la imagen RADAR Sentinel-1 a fecha de 06/04/2018, anterior al evento, con polarización VH sobre el mapa base PNOA máxima actualidad.

La aplicación de la órbita correcta ayuda a que los datos orbitales sean más precisos, mejorando la geocodificación y los posteriores resultados del procesado.

Se requiere, a su vez, de una calibración radiométrica para realizar análisis cuantitativos de imágenes SAR tomadas de diferentes sensores o tomadas con el mismo sensor, pero en diferentes días. Una vez que se ha ejecutado, se tiene para cada pixel el valor que representa la intensidad de retrodispersión del radar, en unidades de decibelios, y se han generado las bandas σ_0 para las dos polarizaciones que nos ofrecen, VH y VV (Tavus et al., 2018, Ban et al., 2017), siendo la banda σ_0 la que aporta una mejor separación entre las zonas terrestres de aquellas con presencia de agua (Bioresita et al., 2018).

En la Figura 8 y en la Figura 9, se muestran los mapas de detalle a fecha posterior a la inundación, ambos en el Sistema de Coordenadas ETRS1989 UTM Zona 30 en los que no se han aplicado ningún filtro de reducción del ruido y, donde se aprecian claramente diferencias entre las dos polarizaciones disponibles, VV y VH. La polarización VH, a simple vista, garantiza valores más significativos.

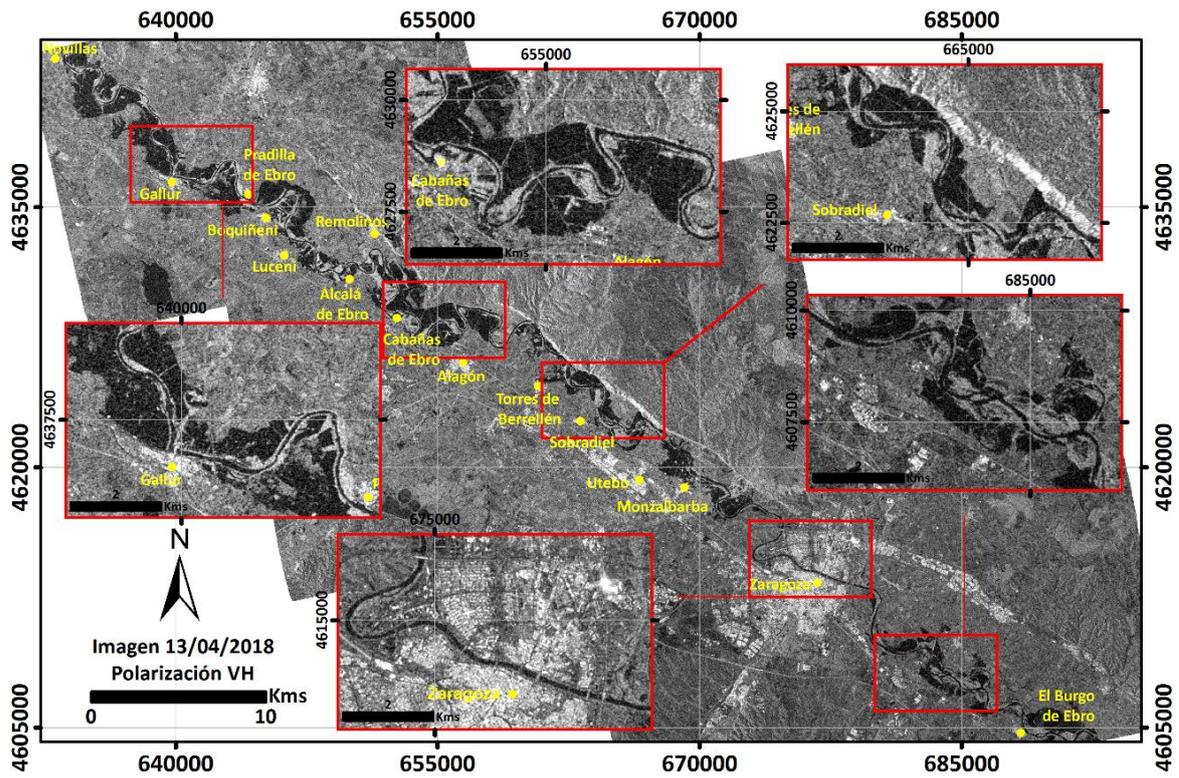


Figura 8. Mapa de detalle de las tres zonas de estudio con la imagen RADAR Sentinel-1 a fecha de 13/04/2018, posterior al evento, con polarización VH.

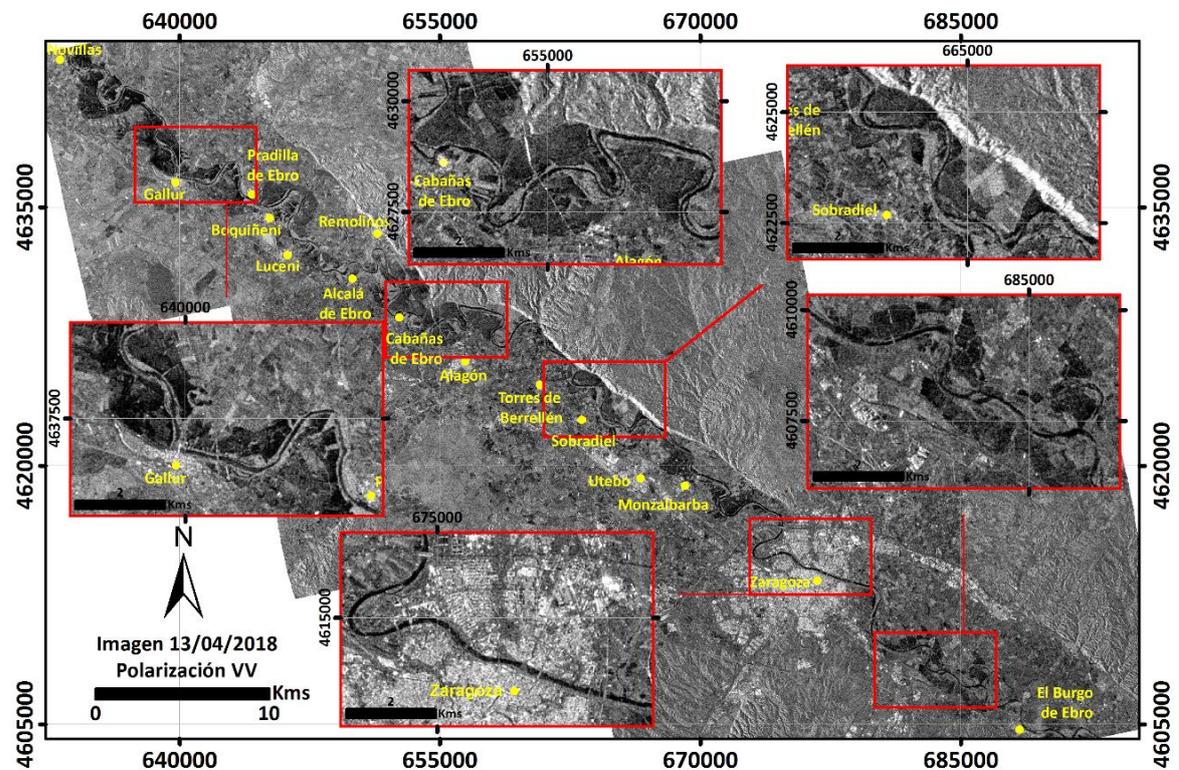


Figura 9. Mapa de detalle de las tres zonas de estudio con la imagen RADAR Sentinel-1 a fecha de 13/04/2018, posterior al evento, con polarización VV.

Las zonas de inundación se manifiestan en tonos oscuros, prácticamente negros en los que los valores de intensidad suelen estar por debajo de los -20dB. Aplicando los conocimientos teóricos característicos de las zonas llanas, el haz de ondas emitidas por el sensor se refleja en la superficie y actuando como espejo, provoca una casi nula vuelta de energía hacia el sensor, de ahí su valor de intensidad y su representación en la imagen RADAR.

El ruido, representado en las imágenes RADAR mediante un moteado, genera una degradación de la calidad de la imagen y hace más complicada la interpretación de las mismas. El programa SNAP ofrece numerosos filtros, todos ellos de carácter estadístico, para corregir este problema, aunque no se consigue totalmente. Gamma Map, Lee, Refined Lee y Lee Sigma son los filtros utilizados en el estudio. Para comprobar qué tipo de filtro es el más adecuado para este trabajo, se ha realizado una comparativa, teniendo en cuenta principalmente, la topografía, la geometría de las áreas urbanas y la polarización.

En la Figura 10, se muestra un ejemplo de un área de detalle de la Zona 3 de estudio con los diferentes filtros aplicados, para la imagen del día 13 de abril y con la polarización VH. Se ha escogido una zona, dentro del área de estudio, que aglutina áreas de inundación, zonas urbanas y zonas de cultivos en las que se pueden apreciar la variabilidad de textura que produce la aplicación de los diferentes filtros.

Tavus et *al.* en el artículo de estudio de inundaciones en Ankara, en mayo 2018, utiliza el filtro Lee Sigma en ventanas de diferentes tamaños: 3x3, 5x5 y 7x7 (m) para las dos polarizaciones, VV y VH. Este filtro utiliza una distribución estadística de los Niveles Digitales (ND) de una ventana de área determinada escogida por el operador y estima cuál debe ser el del píxel considerado (García et *al.*, 2003). Cuanto más grande es el tamaño de la ventana que se escoja, más se reduce el ruido, pero pierde más resolución.

El filtro Gamma Map se basa en el análisis estadístico de Bayes de la imagen y funciona mejor para áreas amplias como océanos, bosques o extensos campos de cultivo (Senthilnath et *al.*, 2013).

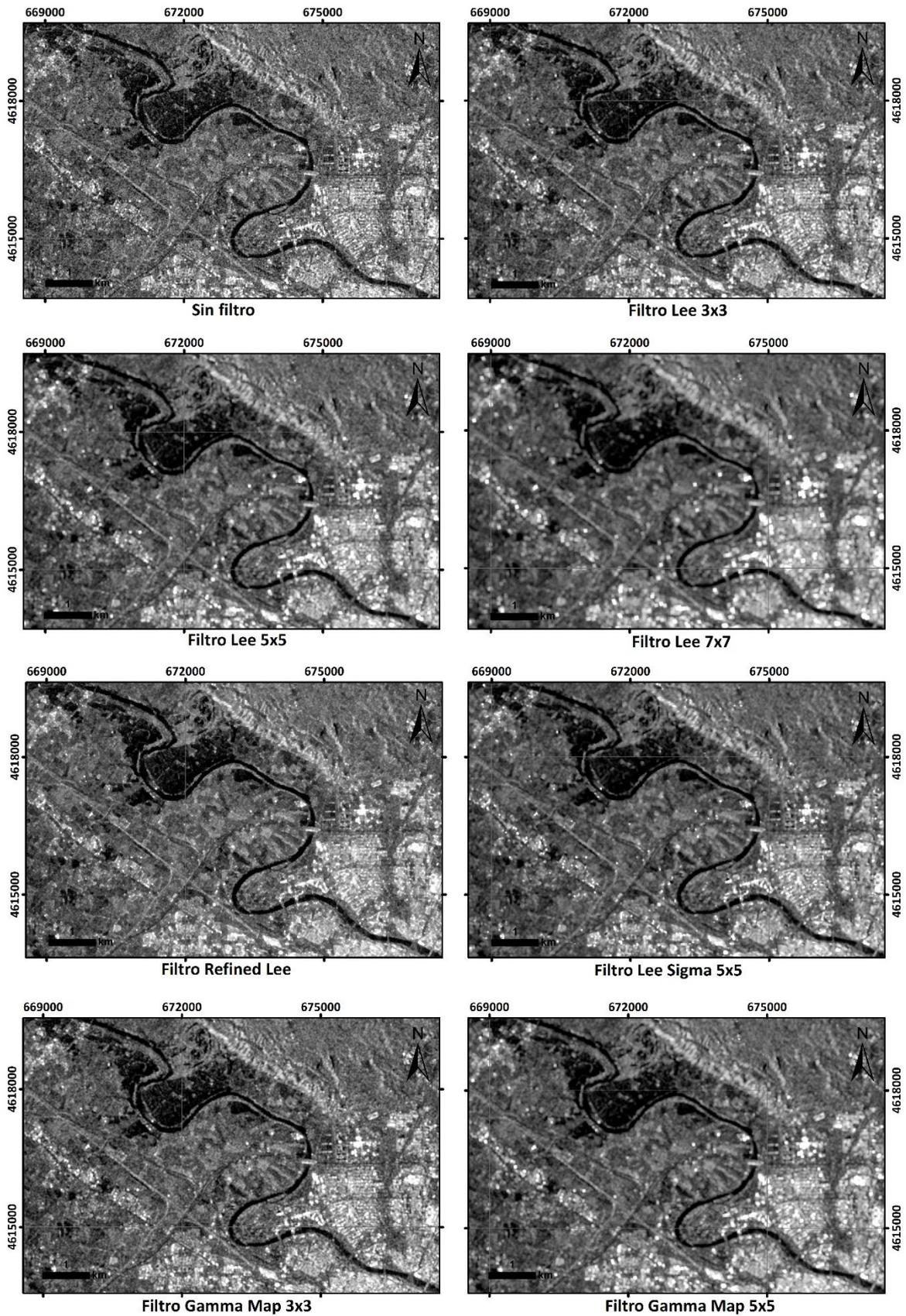


Figura 10. Imágenes de detalle de una sección de la Zona 3 (Zaragoza – El Burgo de Ebro) a fecha de 13/04/2018, posterior al evento de inundación, con polarización VH en las que se muestra la comparativa entre la imagen sin filtro y el resultado de aplicar distintos filtros de distintos tamaños.

Borah et al., 2018 utiliza el filtro Refined Lee con un tamaño de 7x7 (m) para la doble polarización en el mapeo de inundaciones en el Parque Nacional de Kaziranga, Assam (India). En otro caso, al norte de Túnez, aguas arriba de la presa de Sidi Salem, Ezzine et al., 2018, realiza un estudio de las inundaciones provocadas por el río Medjerda utilizando este mismo filtro. Éste proporciona una textura más suave en la imagen minimizando la pérdida radiométrica y textural en las imágenes.

A la vista de los resultados obtenidos al aplicar los distintos tamaños de filtros y a las necesidades del estudio, en el que prevalecen las necesidades de delimitar aquellas áreas con valores de intensidad más pequeños, el filtro Lee 7x7 (m) es el que mejor se adapta. No sería el más adecuado para zonas urbanas, en el que las zonas más brillantes y con los mayores valores de intensidad, se muestran más difusas al escoger un tamaño de ventana grande, pero esas áreas no son las que interesan en este estudio.

Finalmente, para asemejar visualmente las imágenes RADAR a la realidad se realiza una corrección del terreno y ortorrectificación. Estas distorsiones son debidas principalmente a dos causas, cambios en el relieve y el ángulo de incidencia con el terreno con respecto al nadir. La calibración geométrica utilizada en este estudio es *Range Doppler Terrain Correction* y modelo digital de elevación (MDE) – SRTM-3Sec.

3.4. Procesado de imágenes RADAR Sentinel-1

Una vez realizado el pretratamiento, en la bibliografía se encuentran varias metodologías con imágenes de satélite que se pueden utilizar para determinar las áreas de inundación. Muchos autores han empleado diversos algoritmos para la detección de superficies de agua no permanentes. Entre ellos, podemos destacar la clasificación supervisada (Chapman et al., 2015) y no supervisada automática (Martinis, 2011; Borah et al., 2018), combinación RGB con imágenes anteriores y posteriores al evento (Tavus et al., 2018; Perrou et al., 2018) o la técnica de los umbrales de detección o calibración (Henry et al., 2006; Martinis et al., 2009; Perrou et al., 2018; Psomiadis, E., 2016; Zhang et al., 2018). En este estudio, las

metodologías que se han utilizado son: la composición RGB y la técnica de los umbrales calibrados.

Un primer paso, previo a la aplicación de las dos técnicas por separado y necesario para realizar un análisis multitemporal, es la realización de un *stack*. Esta herramienta permite unificar en un único archivo las diferentes bandas de las imágenes anteriores y posteriores al evento favoreciendo la manipulación y la aplicación de las metodologías.

3.4.1. Metodología Composición RGB

Este método se basa en las diferencias que existen entre las imágenes anterior y posterior al evento y, en la que se establece una combinación de bandas para que estas diferencias se hagan notables visualmente. Esa disconformidad viene definida por el cambio en el valor de la intensidad para un mismo pixel en fechas distintas. El resultado es una imagen multitemporal a la que se le asigna una banda a cada uno de los colores primarios para formar una imagen de composición RGB (Red – Green – Blue) (Tavus et al., 2018). Existen muchas posibles combinaciones de bandas para generar la composición, en el estudio se ha escogido para la banda R, la imagen antes del evento y para las bandas G y B, las imágenes durante el evento, obteniendo resultados distintos para la polarización VV y VH. En el apartado de Resultados se muestran los mapas obtenidos y un análisis de los mismos aplicando esta metodología.

3.4.2. Técnica de Umbrales de calibración

Esta técnica, también llamada binarización, es un proceso sencillo y rápido de ejecutar que diferencia las zonas inundadas de las que no lo están. Sabiendo que los valores de retrodispersión en aguas permanentes y en zonas inundadas por lo general, son los más negativos y difieren notablemente de los siguientes valores radiométricos causados por otros cambios físicos como, por ejemplo, el contenido en humedad del suelo, se puede establecer el límite (Bioresita et al., 2018).

A través del histograma característico de polarización obtenemos la cantidad de

pixeles que hay en la imagen para unos valores determinados de intensidad o retrodispersión. De esta forma, manualmente se puede establecer el umbral entre las zonas inundadas de las que no. Utilizando a posteriori, una ecuación matemática de bandas consigo una nueva imagen bicolor separando ambas zonas (Psomiadis, 2016).

Para completar el método y ajustar más el umbral de calibrado se puede crear una capa, máscara de agua, en la que aleatoriamente se pueden digitalizar minipolígonos captando únicamente zonas inundadas y posteriormente, generando el histograma de la misma. De esta forma, se obtienen los valores de intensidad en los que se mueven únicamente las zonas con agua o inundadas. Se consigue de esta forma un valor umbral más preciso.

En el siguiente apartado se adjuntan los pasos seguidos para llegar a la representación de las zonas inundadas mediante esta metodología.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Combinación RGB

Aplicando el método en las tres zonas, se han generado los mapas individuales que se muestran en la Figura 11, Figura 12 y Figura 13. Además, en el apartado de los Anexos se expone el mapa general de inundación con polarización VH y VV con el filtro Lee 7x7 (m) para tener una completa visualización de toda el área de estudio (Mapa 1 y Mapa 2).

Los mapas generales de inundación obtenidos mediante esta metodología para la polarización VH muestran el resultado de aplicar los otros filtros: Refined Lee y Gamma Map 5x5 (m) en los Anexos (Mapa 3 y Mapa 4).

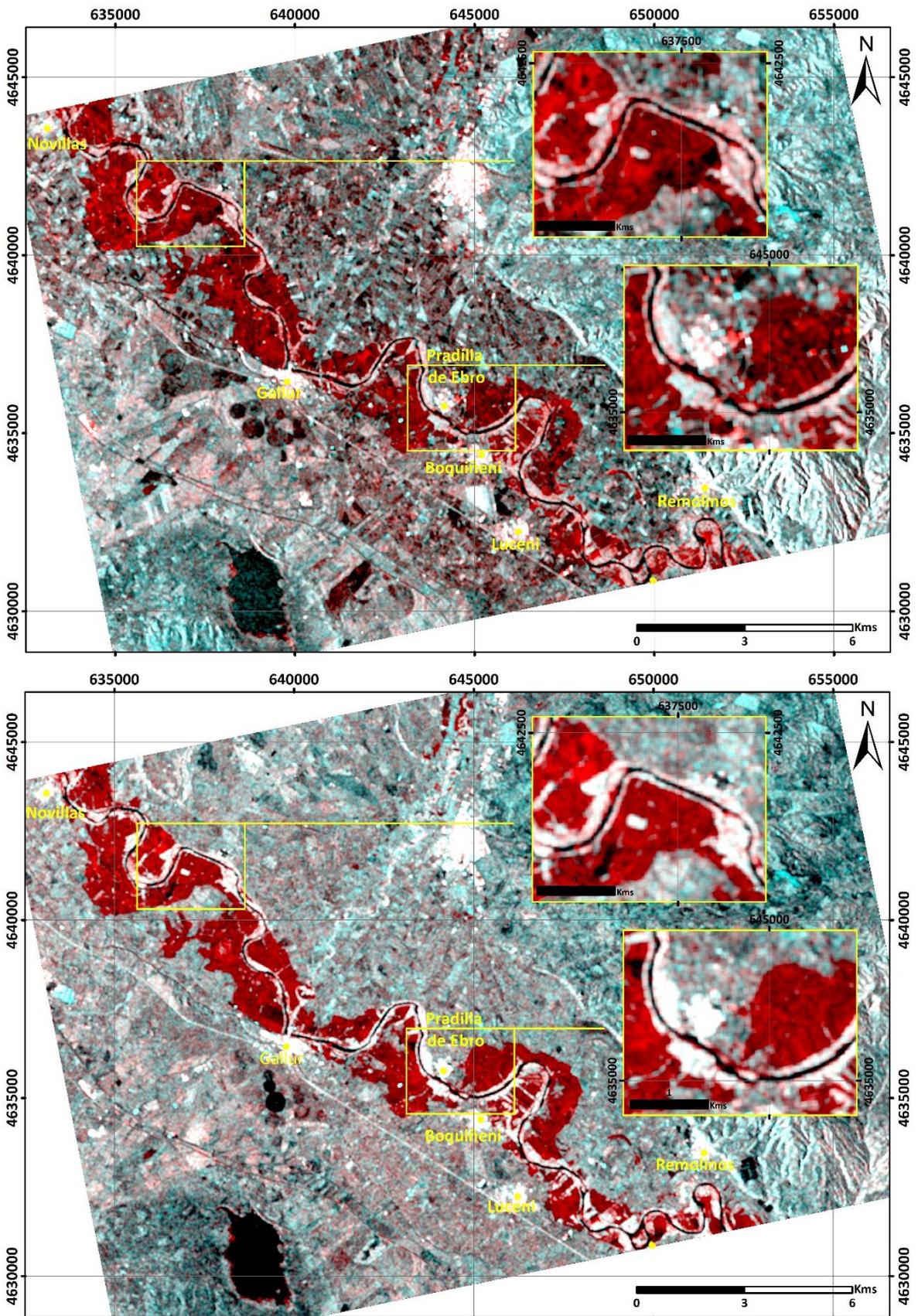


Figura 11. Mapa de composición RGB de la Zona 1 (Novillas – Pradilla de Ebro) con filtro Lee tamaño 7x7 (m). Imagen superior con polarización VV e imagen inferior con polarización VH.

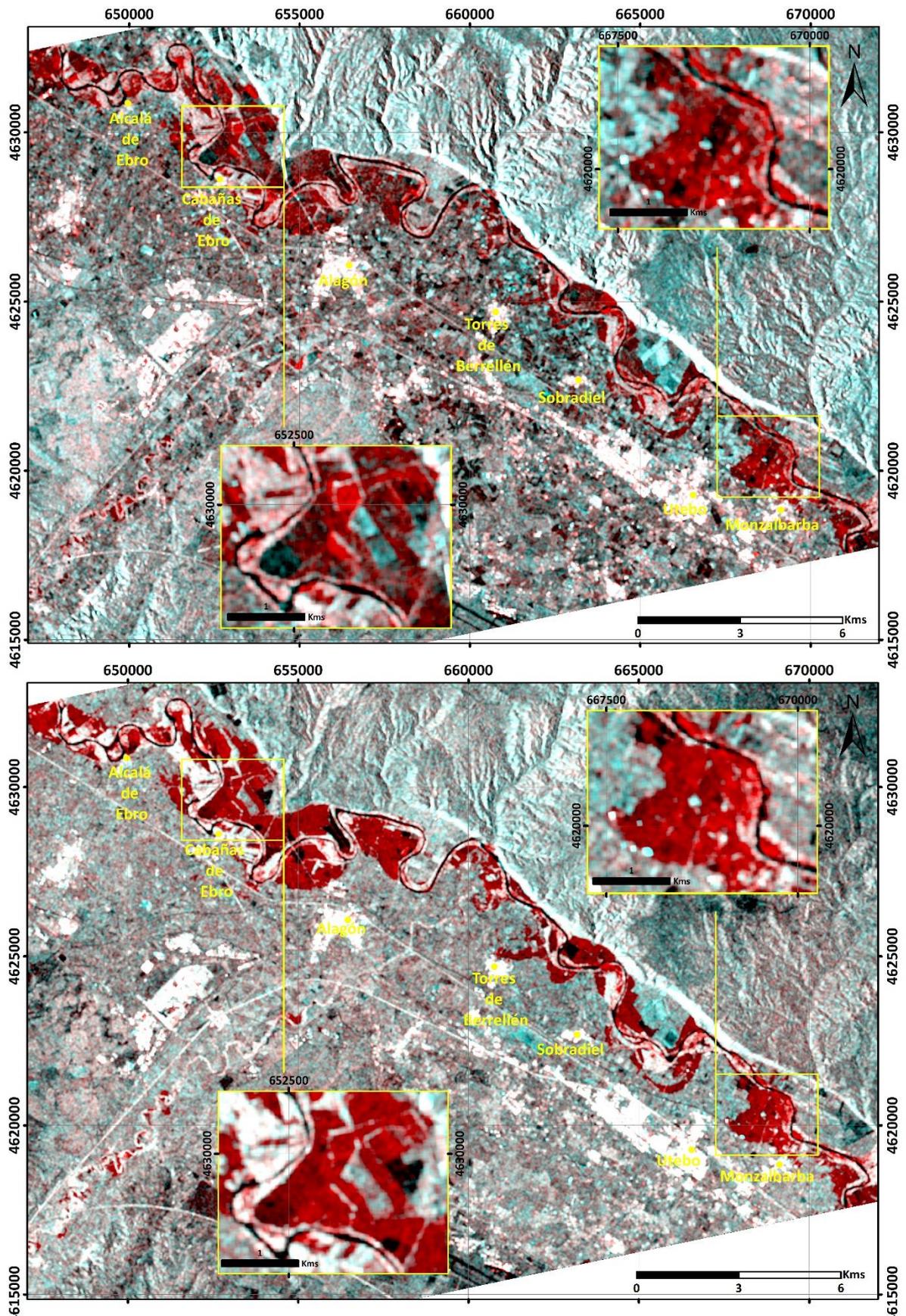


Figura 12. Mapa de composición RGB de la Zona 2 (Alcalá de Ebro – Torres de Berrellén) con filtro Lee tamaño 7x7 (m). Imagen superior con polarización VV e imagen inferior con polarización VH.

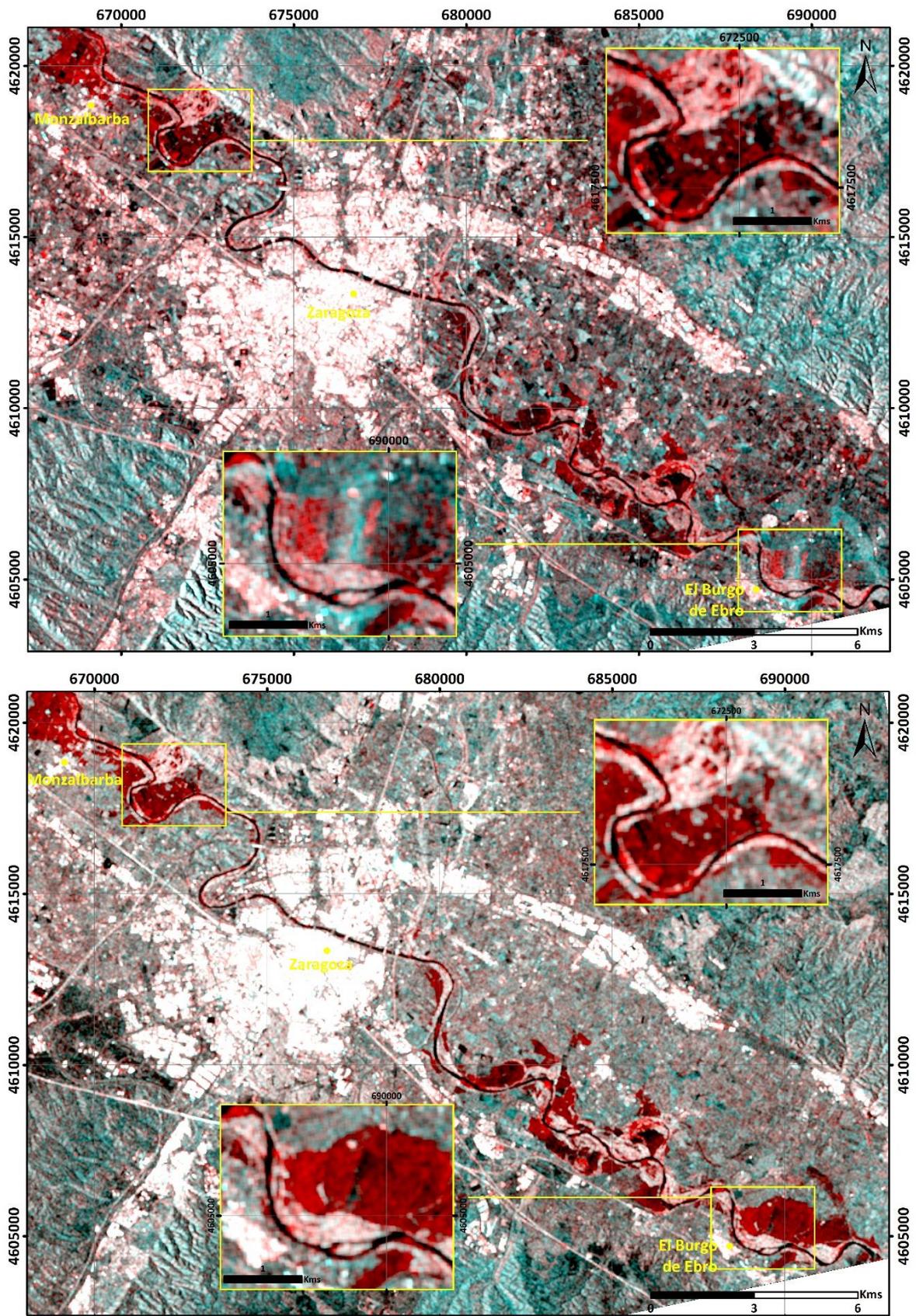


Figura 13. Mapa de composición RGB de la Zona 3 (Zaragoza – El Burgo de Ebro) con filtro Lee tamaño 7x7 (m). Imagen superior con polarización VV e imagen inferior con polarización VH.

Los mapas obtenidos reflejan las zonas inundadas en color rojo, en negro se muestran las aguas permanentes, como el río Ebro o algún lago; en tonos grises y blancos aquellas zonas que han permanecido inalteradas en ambas fechas y en tonos azulados aquellas en las que ha habido una mayor respuesta hacia el sensor pero que no guardan ningún tipo de relación con la presencia de agua.

Cabe destacar que justo en la ribera del río la presencia de vegetación riparia altamente masificada y de crecimiento vertical, genera una dispersión por doble rebote o una dispersión por volumen (Figura 14). Esto unido al hecho de que el sensor utilizado sea de la banda C, con un rango de penetración en el suelo desnudo o la vegetación como máximo de 5 cm provoca que, aunque la zona esté inundada no dé como resultado la presencia de agua. Son zonas que se ven en tonos blancos o ligeramente rosados.



Figura 14. Vistas aéreas de Novillas, Pradilla de Ebro y Boquiñeni (de izquierda a derecha) a fecha de 14 de abril de 2018 en las que se observa la crecida del Ebro y la vegetación característica de ribera altamente inundada. (Fuente: El País, 2018).

A su vez, los resultados corroboran que la polarización VH es más idónea para delimitar las áreas inundadas. Genera superficies bien definidas y correctamente delimitadas, resultados que no ofrece la polarización VV. Ésta última aporta buenos resultados para zonas topográficamente elevadas, pero no tanto para zonas planas como las llanuras de inundación.

4.2. Umbrales de calibración

Los resultados que se presentan a continuación, referidos a la Zona 1: Novillas – Pradilla de Ebro, son de igual aplicación a las otras dos zonas de estudio, aunque no se exponga aquí su desarrollo.

En la Figura 15 se observa la relación entre las polarizaciones y los histogramas característicos para cada una de ellas. El histograma de la polarización VV muestra una curva muy grande representativa de los valores de intensidad que oscilan entre -2.5 y -20dB, un rango muy amplio característico de zonas que oscilan entre muy rugosas y moderadamente ásperas. Mientras que no se observa una clara proyección de valores de baja retrodispersión.

El histograma propio de la polarización VH sí muestra dos claras curvas de valores donde oscilan los valores de intensidad específicos de la imagen y es con el que se ha trabajado. Por un lado, la curva que aporta un mayor número de píxeles y que representa las zonas sin agua y por otro, una curva de menor tamaño y con valores de intensidad más pequeños que representa las zonas con agua. Es entre ambas curvas, donde se puede establecer el límite de calibración.

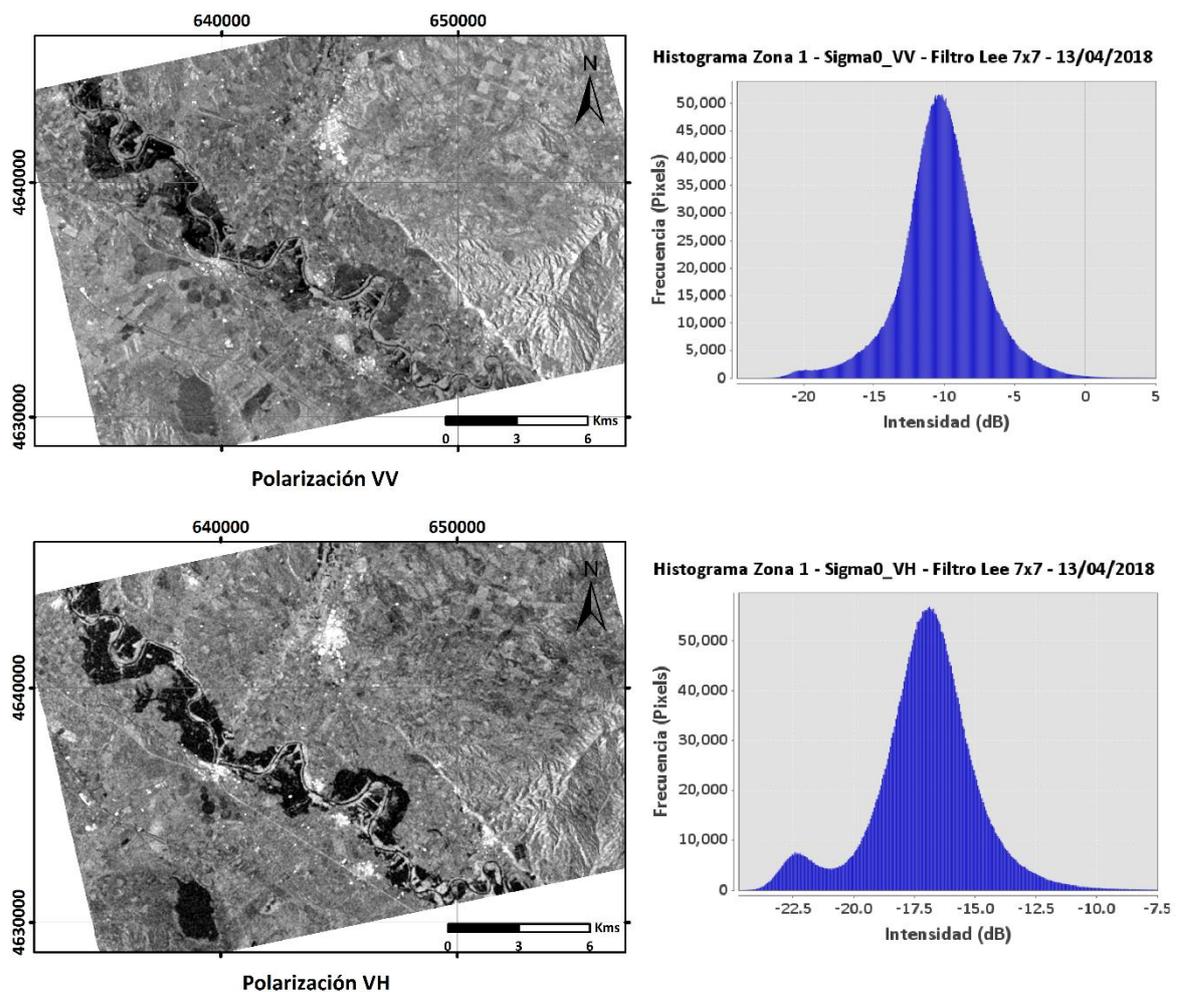


Figura 15. Representación de los histogramas característicos para la banda con polarización VV y para la VH en la imagen RADAR del 13/04/2018 filtrada con Lee 7x7 (m).

Analizando en mayor profundidad los histogramas se observa que la polarización cruzada VH, aportan un rango más amplio de valores de retrodispersión en superficies con vegetación que la polarización simple, VV, lo que genera que en estas últimas haya una omisión de zonas inundadas. (Clement et al., 2017).

Para precisar más el punto límite entre las zonas con agua y sin agua se ha generado una máscara sobre la imagen de polarización VH, creando minirecintos y captando únicamente las zonas en las que hay agua. De esta forma, se ha obtenido el histograma que se muestra en la Figura 16. Estudiando el resultado, se llega a la conclusión de que los valores más representativos de la presencia de agua oscilan mayoritariamente entre -21 y -24dB, por lo que, se ha considerado tomar como límite -21dB.

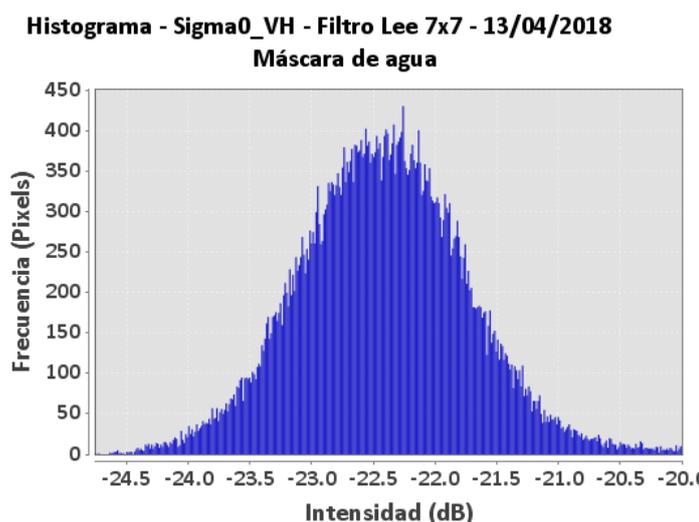


Figura 16. Histograma representativo de las zonas de agua creado a partir de la imagen RADAR del 13/04/2018 con la polarización VH y filtro Lee 7x7.

Con la herramienta *Ráster – Band Maths* del programa SNAP se ha generado una capa binaria en la que por un lado se representan los valores inferiores a -21dB, representativos del agua y las zonas inundadas, y por otro, los superiores a éste que mostrarían las zonas secas. El resultado de esta operación representada sobre el Plan Nacional de Ortografía Aérea Máxima actualidad (PNOA) da como resultado en el mapa de la Zona 1 que se muestra en la Figura 17.

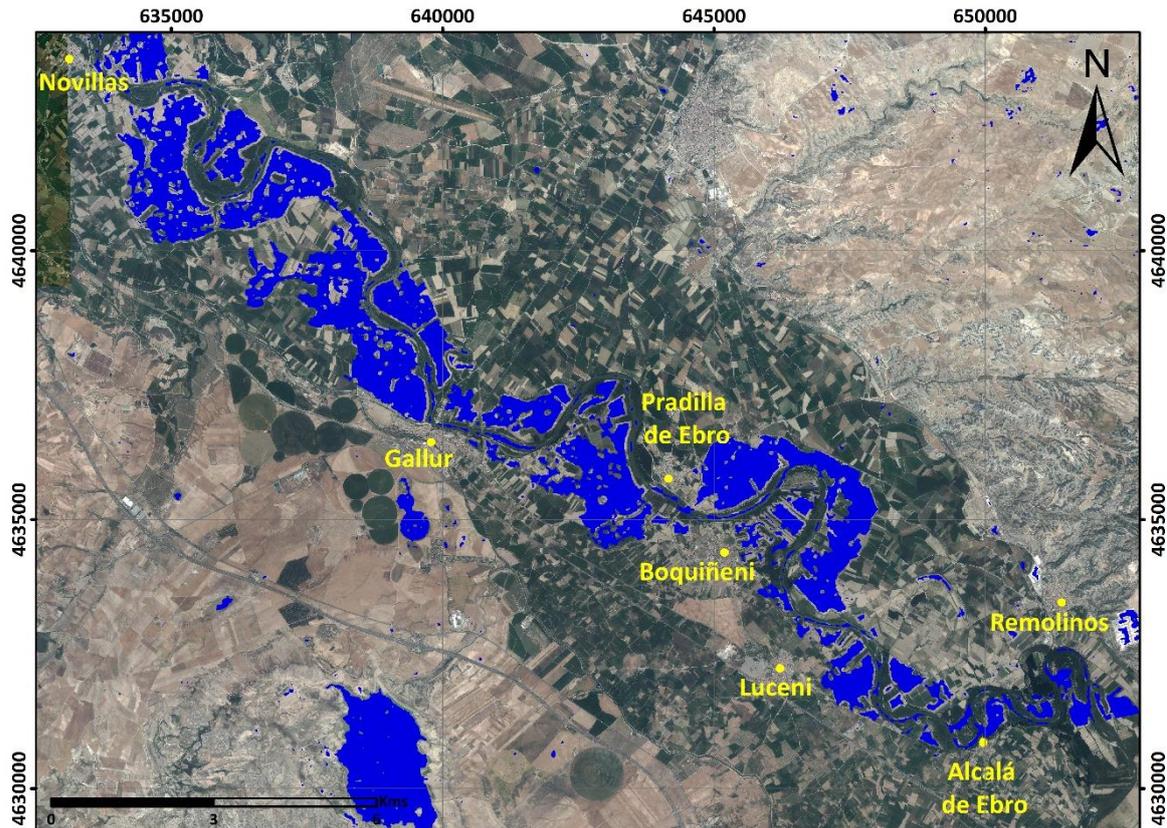


Figura 17. Mapa de la Zona 1: Novillas – Pradilla de Ebro calculado mediante la metodología de umbrales de calibración, con un límite de intensidad de -21dB. Mapa base PNOA Máxima actualidad.

Hay que tener en cuenta que factores como las características del terreno o el ángulo de incidencia pueden producir zonas de sombra (obsérvese este efecto en la Figura 17 en la parte superior derecha). Estas tienen valores de retrodispersión similares a los que tienen las superficies con presencia de agua, ocasionando una sobrerrepresentación de áreas inundadas (Clement et al., 2017).

Por ello, para evitar los errores de delimitación se podría combinar la técnica de umbrales junto con la fotointerpretación para añadir áreas no identificadas por defecto o eliminar áreas identificadas por exceso mejorando de esta forma, la calidad de los resultados obtenidos (Ezzine et al., 2018).

También hay que considerar que esta técnica no discrimina entre áreas inundadas permanentemente de las inundadas temporalmente, por lo que para eliminar esa representación en exceso se ha generado una capa únicamente de las zonas permanentes. Esta se ha creado a partir de la imagen RADAR a fecha del día 6 de

abril de 2018 en el que todavía no había comenzado el periodo de avenida. Mediante la resta de la capa de inundación del día 13 de abril de 2018 y la generada el día 6, con la herramienta *Band Maths*, se consiguen las áreas de inundación temporal que se representan en color rojo en la Figura 18.

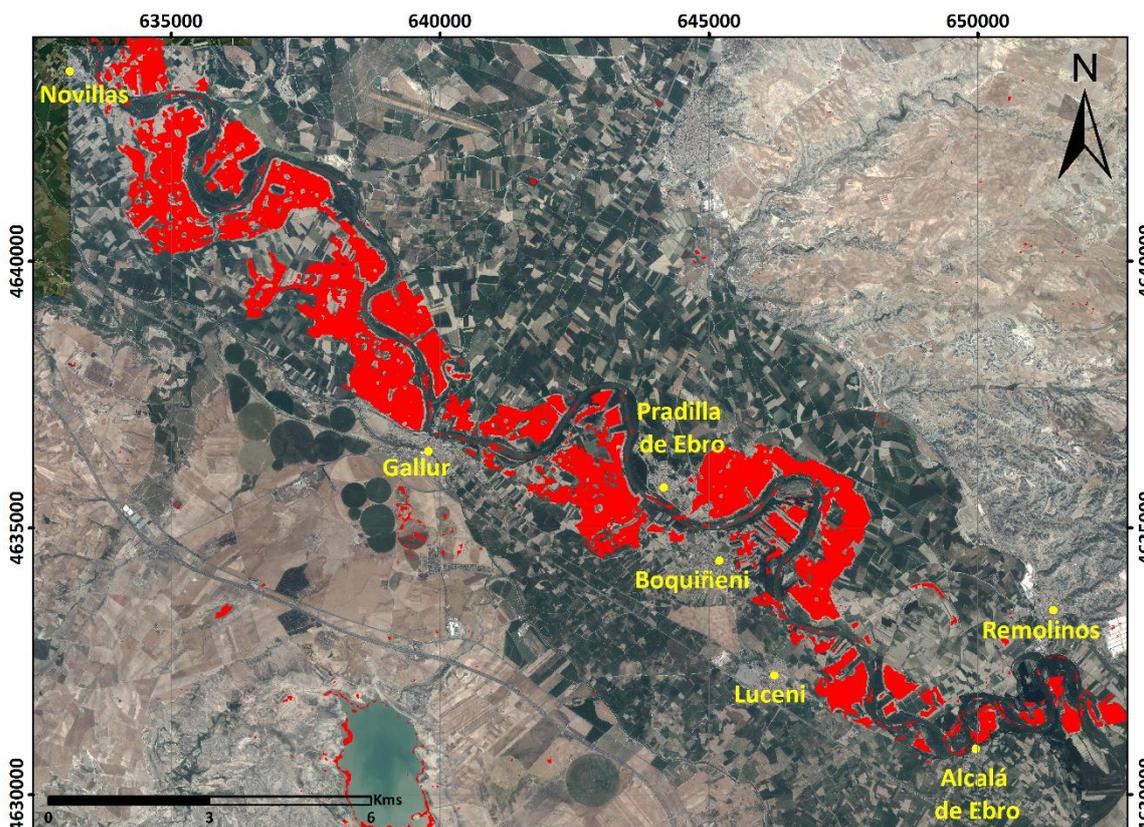


Figura 18. Mapa representativo únicamente de las zonas de inundación de la Zona 1: Novillas - Pradilla de Ebro. Mapa base PNOA Máxima actualidad.

De esta forma, se obtienen de una forma más exacta las áreas de inundación. En el Mapa 5 de los Anexos están representadas las áreas de inundación mediante esta técnica de toda el área completa de estudio.

4.3. Fotointerpretación con ortofotografía

Para completar el estudio, se ha trabajado con las ortofotografías realizadas por la CHE en las fechas cercanas a la avenida. Por un lado, tenemos una imagen que va desde Novillas hasta Alagón, que denominan como la zona de Ribera Alta (Figura 19), a fecha del día 14 de abril de 2018 y; por otro lado, una imagen que

abarca desde la salida de Zaragoza hasta El Burgo de Ebro a fecha del 17 de abril de 2018 y que designan Ribera Baja.

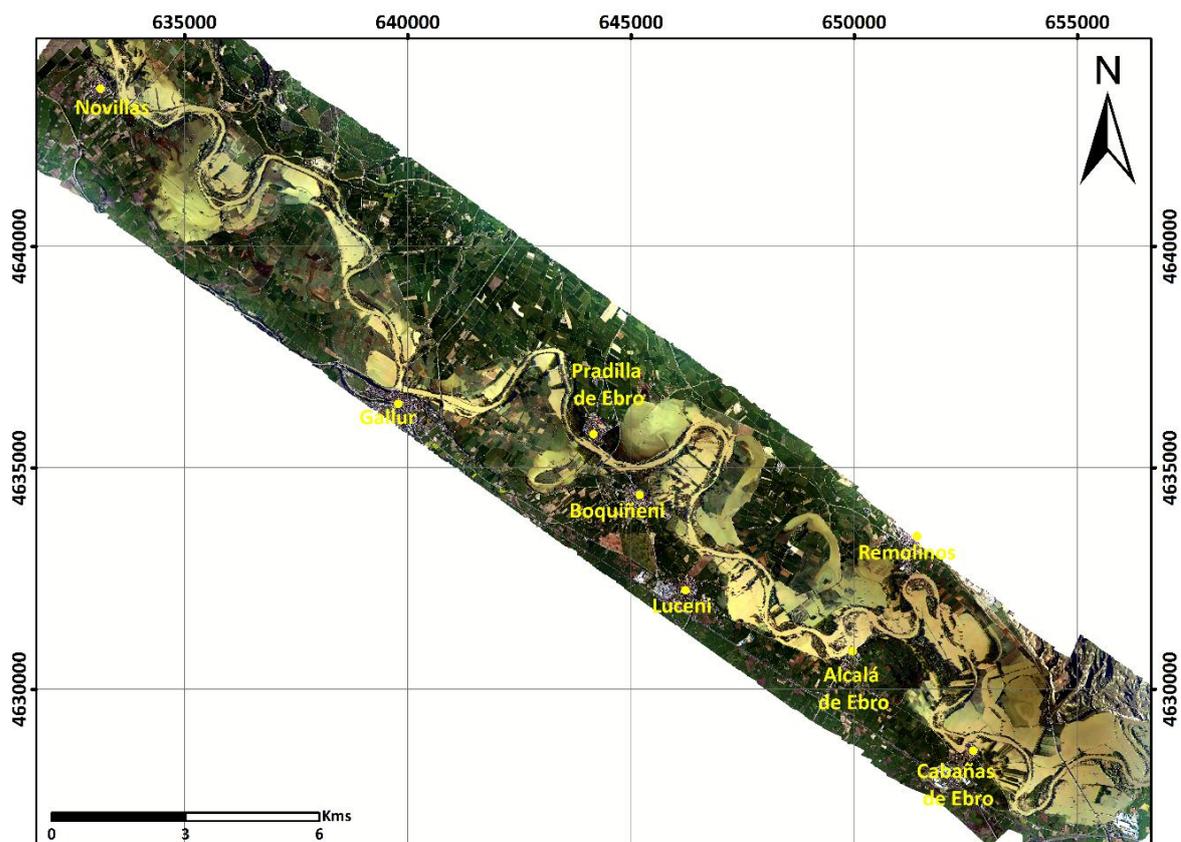


Figura 19. Ortofotografía de la Ribera Alta a fecha del 14 de abril de 2018. Sistema de coordenadas ETRS1989 UTM Zona 30.

Analizando los datos históricos de caudales y niveles del año 2018 obtenidos por petición a la CHE (Tabla 4), conocemos cuando se alcanzan los caudales máximos anuales del Ebro en el área de estudio. En Novillas, el día 14 de abril y el 15 de abril en presa Pina por debajo de la población de El Burgo de Ebro. En las poblaciones intermedias los niveles máximos se centran entre esas dos fechas con distintas horas de caudal punta progresando aguas abajo.

A la vista de esos datos, se puede interpretar que el día de máxima inundación para la Ribera Alta es el 14 de abril y que es factible la comparación entre la imagen RADAR del día 13 de abril de 2018 a las 17.55 horas y la ortofotografía de la Ribera Alta. Una comparativa para determinar las áreas de inundación calculadas mediante una metodología con imagen RADAR y por otro, mediante la

fotointerpretación de las zonas inundadas y el cálculo de la superficie anegada para un día en concreto. En cambio, no sería correcto la equiparación con la ortofotografía de la Ribera Baja ya que la fecha entre ambas varía en 4 días, tiempo más que suficiente para que haya muchos cambios de superficie inundada, aunque se podría establecer una relación de cómo ha evolucionado la avenida entre una y otra fecha.

Por tanto, se ha procedido a digitalizar sobre la ortografía de la Ribera Alta las zonas en las que se percibía presencia de agua inundando los cultivos generando una capa vectorial. A su vez, se ha digitalizado también el río Ebro poniendo como mapa base el PNOA de máxima actualidad. De esta forma, se discriminan las zonas inundadas que lo están permanentemente de las que están inundadas sólo temporalmente. Debido al tamaño y para una mejor visualización, se adjunta en el apartado Anexos el Mapa 6 con lo anteriormente descrito

Para establecer la comparación posterior, se ha transformado la imagen obtenida por calibración mediante umbrales en un archivo vectorial. Esta capa junto con la obtenida por fotointerpretación y la de áreas comunes han sido evaluadas para calcular el área de cada una de ellas (Tabla 6). (Anexos, Mapa 7).

Tabla 6. Valores de superficie inundada en la Ribera Alta.

Área de inundación RADAR 13/04/2018	2640.61 hectáreas
Área de inundación Ortofotografía 14/04/2008	4653.13 hectáreas
Área común de inundación	1767.88 hectáreas

Cabe destacar que por un lado en la imagen RADAR las máximas áreas de inundación se encuentran en la parte alta de ese tramo del río y que en la ortofotografía las máximas están en la parte baja de esa zona de estudio. Esto se debe a la fecha en la que se ha obtenido cada una de ellas y de esta forma se puede ver cómo ha evolucionado el desbordamiento del río en apenas unas horas.

La variabilidad en el valor del área de inundación se debe principalmente a que la calidad de la imagen RADAR, a la que se le han tenido que realizar numerosos tratamientos, se ha visto reducida. Esto genera una pérdida de calidad que unido

al hecho de que hay valores de intensidad que no se perciben como áreas inundadas (zonas arbóreas próximas al cauce, principalmente) provoca una reducción en la superficie calculada.

5. CONCLUSIONES

Debido a la periodicidad de las inundaciones que se producen en el curso medio del río Ebro hace que la utilización de la teledetección para monitorizarlas sea una herramienta muy valiosa. Esto, unido al hecho de que se puede acceder a las imágenes RADAR de la ESA de forma gratuita y de que se dispone del software SNAP de libre acceso para poder tratarlas favorece su uso para el estudio gracias a la disponibilidad de recursos.

Los resultados mostrados en el estudio, mediante mapas de inundación, deja patente la potencia de la utilización de estas imágenes para el estudio de inundaciones, a pesar de que la necesidad de aplicar numerosos filtros para poder reducir el efecto moteado, merma la calidad de resolución de las imágenes y esto tiene efecto en el resultado final de inundación. También, cabe destacar que la comparativa con resultados obtenidos con ortofotografía genera ciertas dudas en cuanto a limitaciones de captación de ciertas áreas en las que el sensor de banda C del Sentinel-1 no aporta buenos resultados como, por ejemplo, en zonas inundadas con vegetación de crecimiento vertical, predominantes en las riberas de los ríos.

De las dos polarizaciones que aporta cada una de las imágenes RADAR la que mejores resultados ha dado en este estudio ha sido la polarización VH, dando superficies de inundación más amplias que las obtenidas con la polarización VV. En su estudio Ezzine et al. (2018) también confirma que la polarización VH es la que mejores resultados le ha dado, mientras que Psiomiadis (2016) en su artículo sobre la cuenca del río *Sperchios* (Grecia) es la polarización VV la favorece la representación de las áreas anegadas mediante el método de calibración. Esto en parte, se debe a la posición del sensor, dirección y el ángulo de incidencia del haz de energía y también, orientación de las superficies a captar, favoreciendo de este modo, una polarización u otra dependiendo de los requerimientos del estudio.

Las ventajas de la utilización de la metodología de composición RGB es que garantiza una clara diferenciación entre las zonas de inundación permanente de las zonas inundadas temporalmente, mientras que para conseguir esa distinción en técnica de umbrales de calibración es necesario ejecutar otros procesos. A su vez, la presencia de áreas topográficamente elevadas genera áreas oscuras o de sombra con coeficientes de retrodispersión similares a los que se dan en zonas inundadas de ahí que se deba hacer un estudio pormenorizado discriminando estas áreas, favoreciendo de esta forma que no se produzca una sobrerrepresentación de áreas inundables.

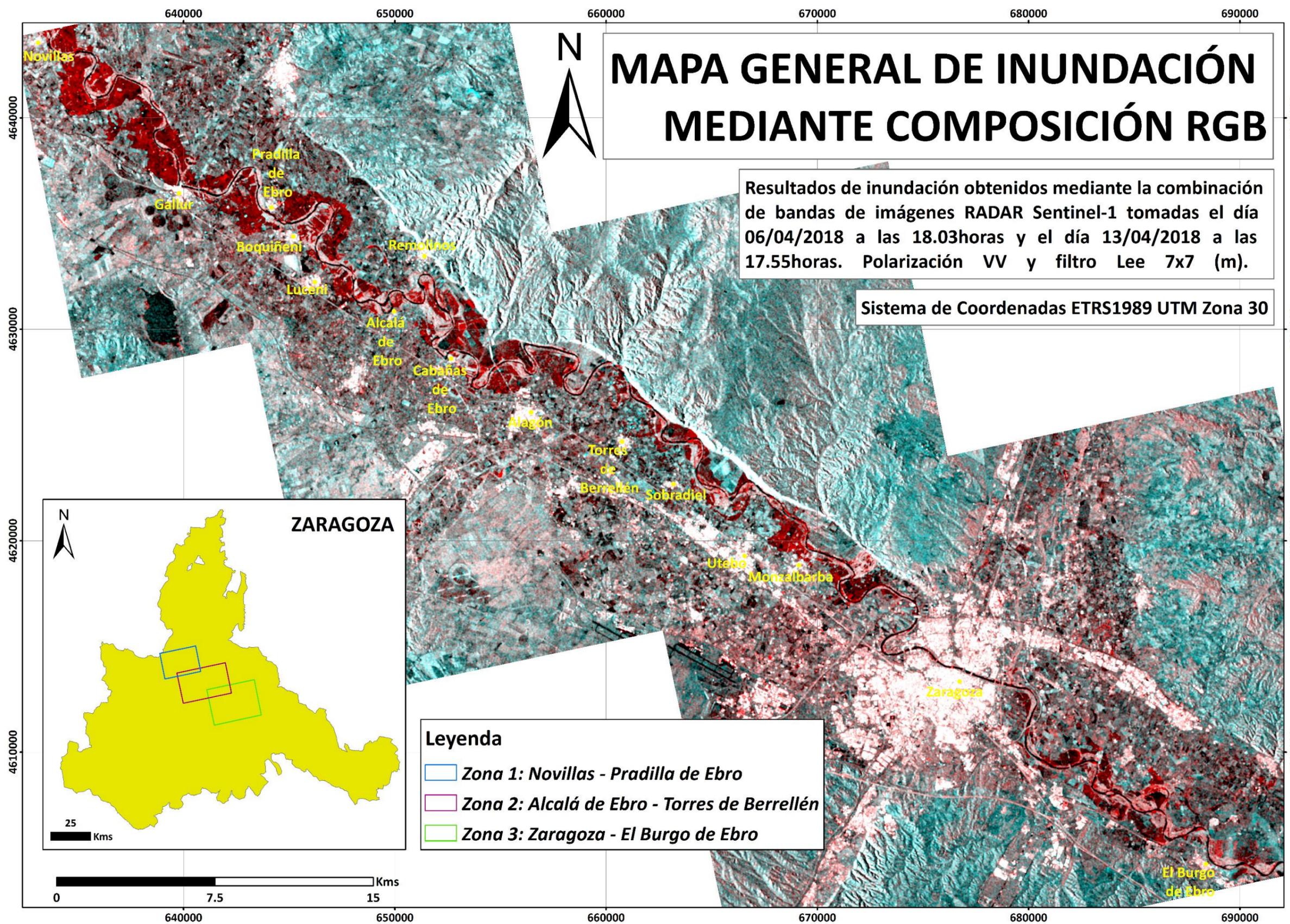
Generalmente, los eventos de inundación se dan en condiciones meteorológicas de nubosidad y lluvia, por ello la opción de las imágenes RADAR que son captadas bajo cualquier circunstancia adversa, es muy adecuada e idónea. En el caso de este estudio, además se ha podido utilizar una ortofotografía aportada por la CHE y que carece de nubes. De esta forma, se ha podido complementar el estudio mediante digitalización de áreas que no habían sido captadas por el sensor RADAR. Esto quiere decir, que cualquier otra metodología que se pueda utilizar simultáneamente y pueda complementarla, mejorará los resultados obtenidos únicamente mediante un único método.

Para finalizar, la mejora futura en los sensores de captación favorecerá a una mayor calidad de resolución en las imágenes captadas y con ello, mejores soluciones y resultados en el estudio, tanto de la superficie terrestre como de los océanos.

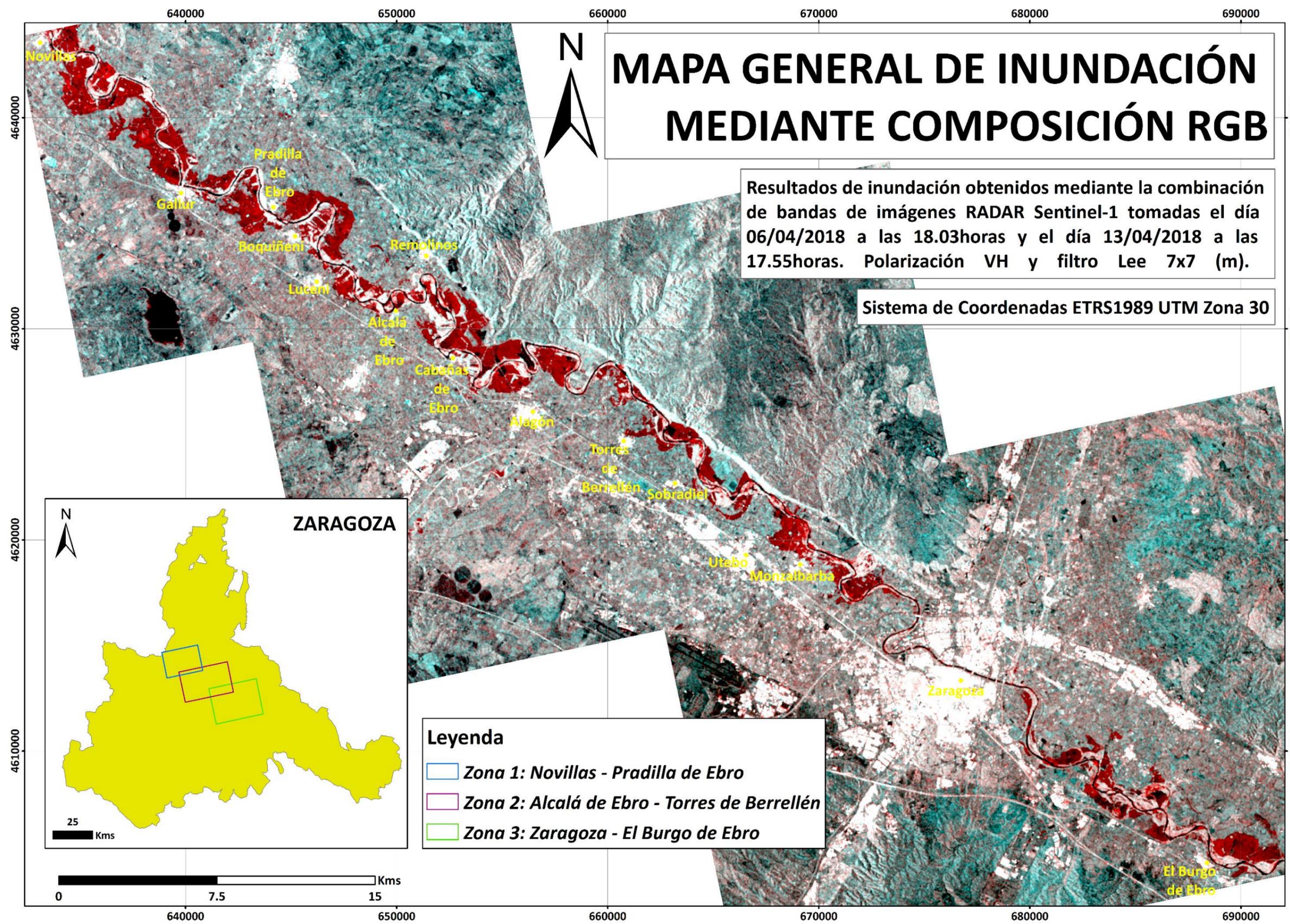
Nota: Todos los mapas expuestos en el estudio han sido georreferenciados, diseñados y generados con el software ArcGis versión 10.5.1. con licencia gratuita para estudiantes de un año (2018 - 2019).

6. ANEXOS

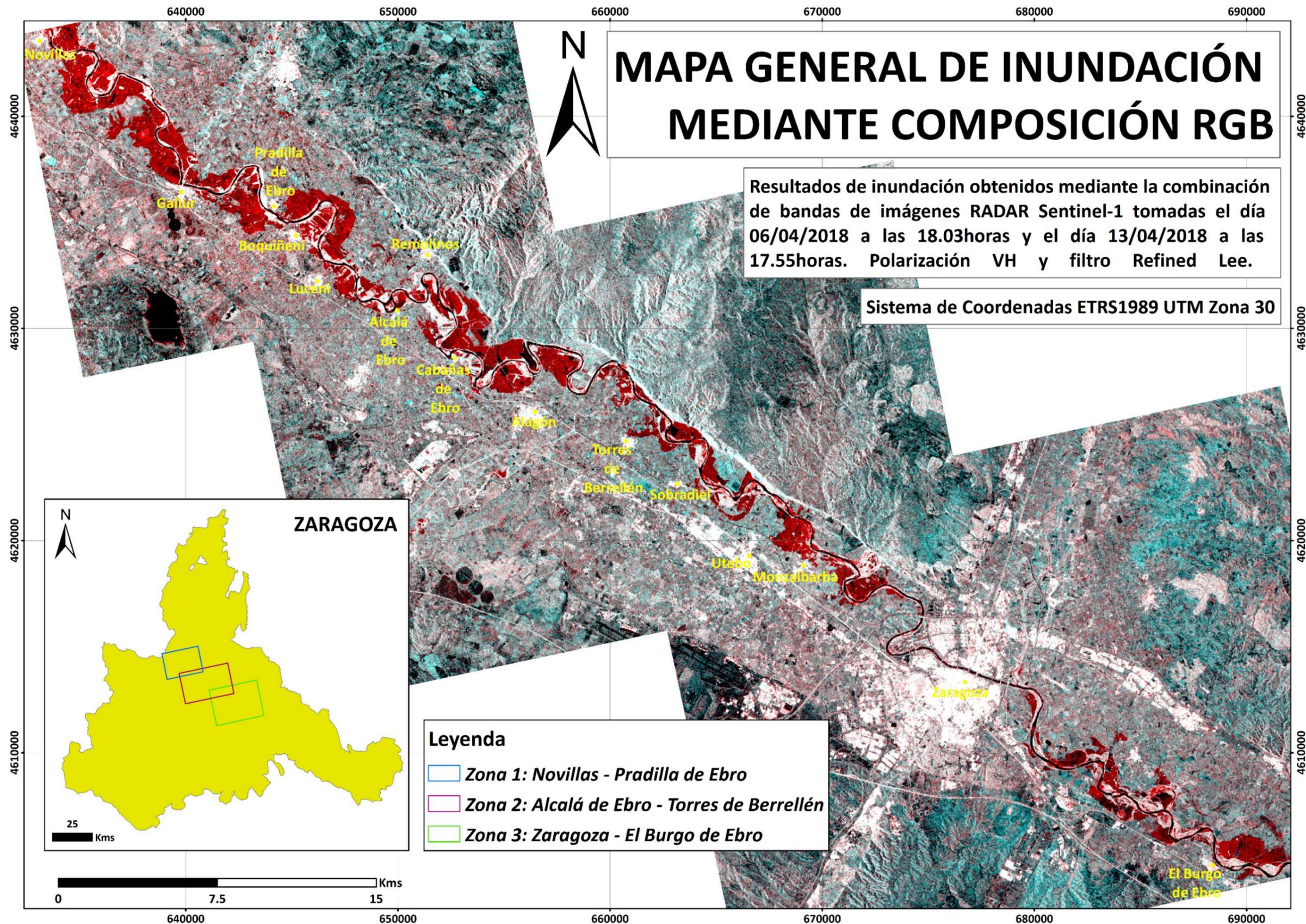
1. Mapa de general de inundación de toda la zona de estudio mediante composición RGB creado a partir de las imágenes RADAR del día 06/04/2018 y 13/04/2018, ambas en la polarización VV con un filtro Lee 7x7 (m).	36
2. Mapa de general de inundación de toda la zona de estudio mediante composición RGB creado a partir de las imágenes RADAR del día 06/04/2018 y 13/04/2018, ambas en la polarización VH con un filtro Lee 7x7 (m).	37
3. Mapa de general de inundación de toda la zona de estudio mediante composición RGB creado a partir de las imágenes RADAR del día 06/04/2018 y 13/04/2018, ambas en la polarización VH con un filtro Refined Lee.	38
4. Mapa de general de inundación de toda la zona de estudio mediante composición RGB creado a partir de las imágenes RADAR del día 06/04/2018 y 13/04/2018, ambas en la polarización VH con un filtro Gamma Map 5x5 (m).	39
5. Mapa de general de inundación de toda la zona de estudio mediante umbrales de calibración creado a partir de la imagen RADAR del día 13/04/2018 y un depurado con la capa de aguas inundadas permanentemente.	40
6. Mapa general de inundación obtenido mediante fotointerpretración de las áreas inundadas con una ortofotografía aportada por la Confederación Hidrográfica del Ebro - CHE.	41
7. Mapa general de inundación comparativo entre la imagen RADAR del día 13/04/2018 y la ortofotografía aportada por la Confederación Hidrográfica del Ebro - CHE del día 14/04/2018.	42



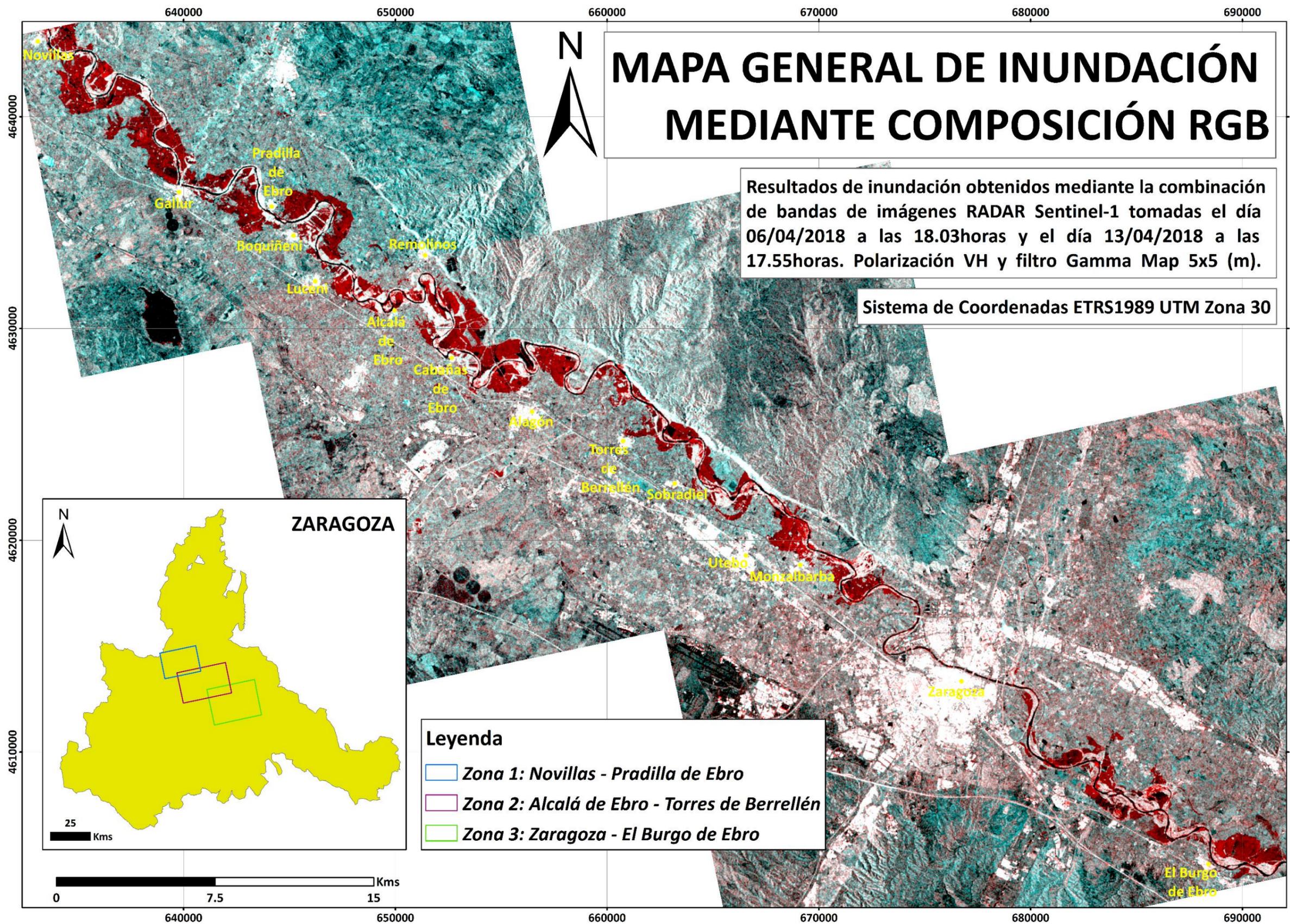
1. Mapa de general de inundación de toda la zona de estudio mediante composición RGB creado a partir de las imágenes RADAR del día 06/04/2018 y 13/04/2018, ambas en la polarización VV con un filtro Lee 7x7 (m).



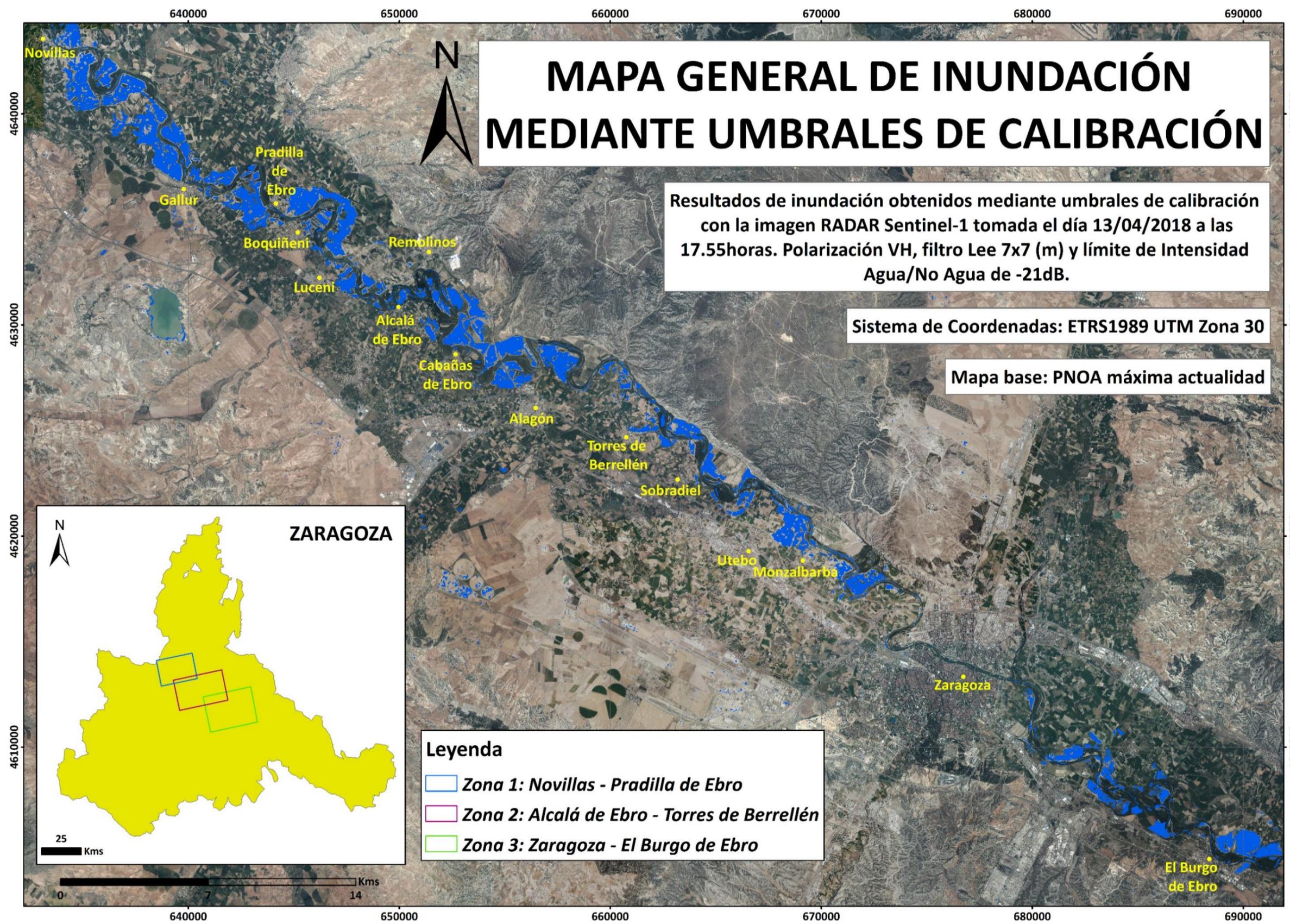
2. Mapa de general de inundación de toda la zona de estudio mediante composición RGB creado a partir de las imágenes RADAR del día 06/04/2018 y 13/04/2018, ambas en la polarización VH con un filtro Lee 7x7 (m).



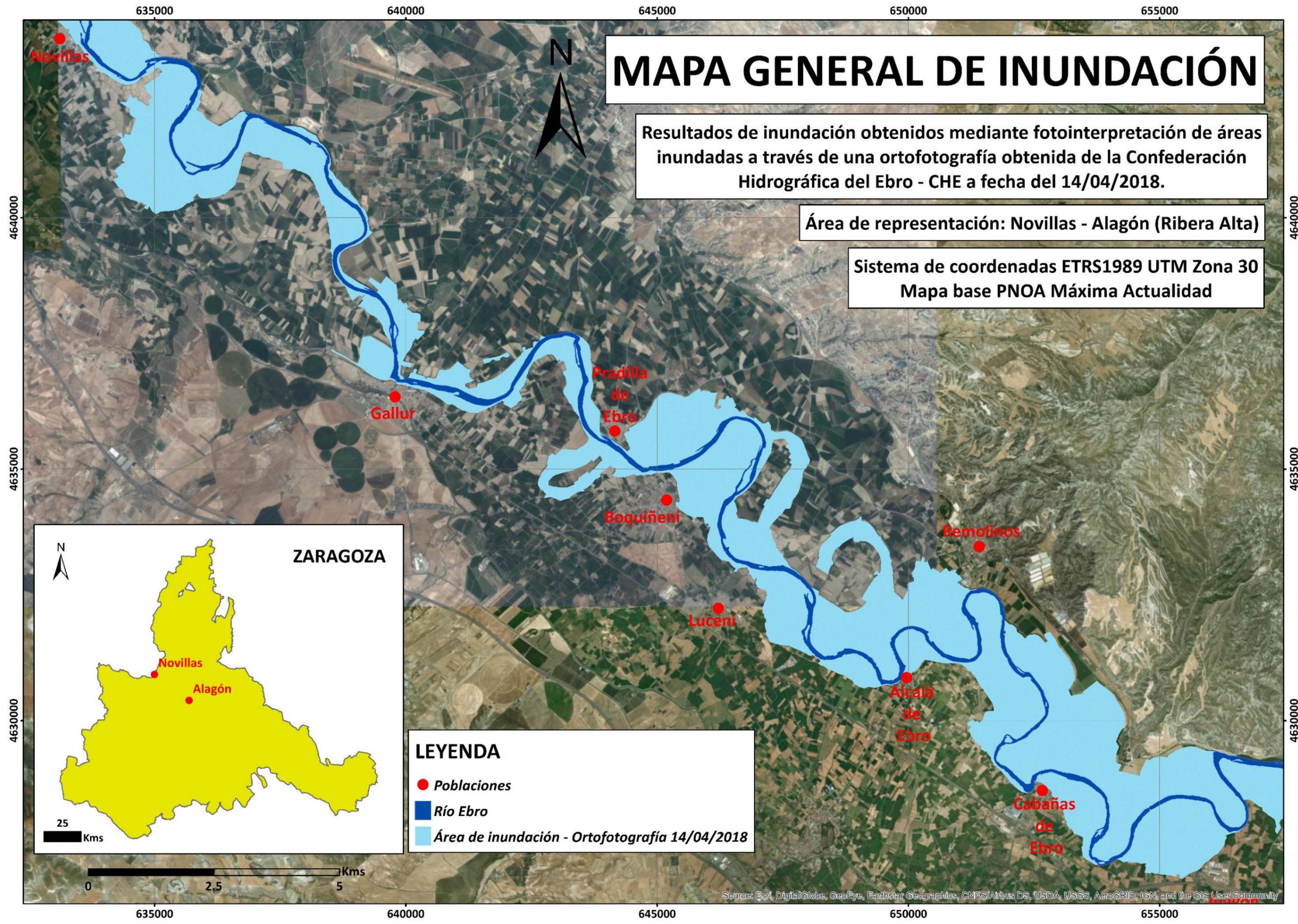
3. Mapa de general de inundación de toda la zona de estudio mediante composición RGB creado a partir de las imágenes RADAR del día 06/04/2018 y 13/04/2018, ambas en la polarización VH con un filtro Refined Lee.



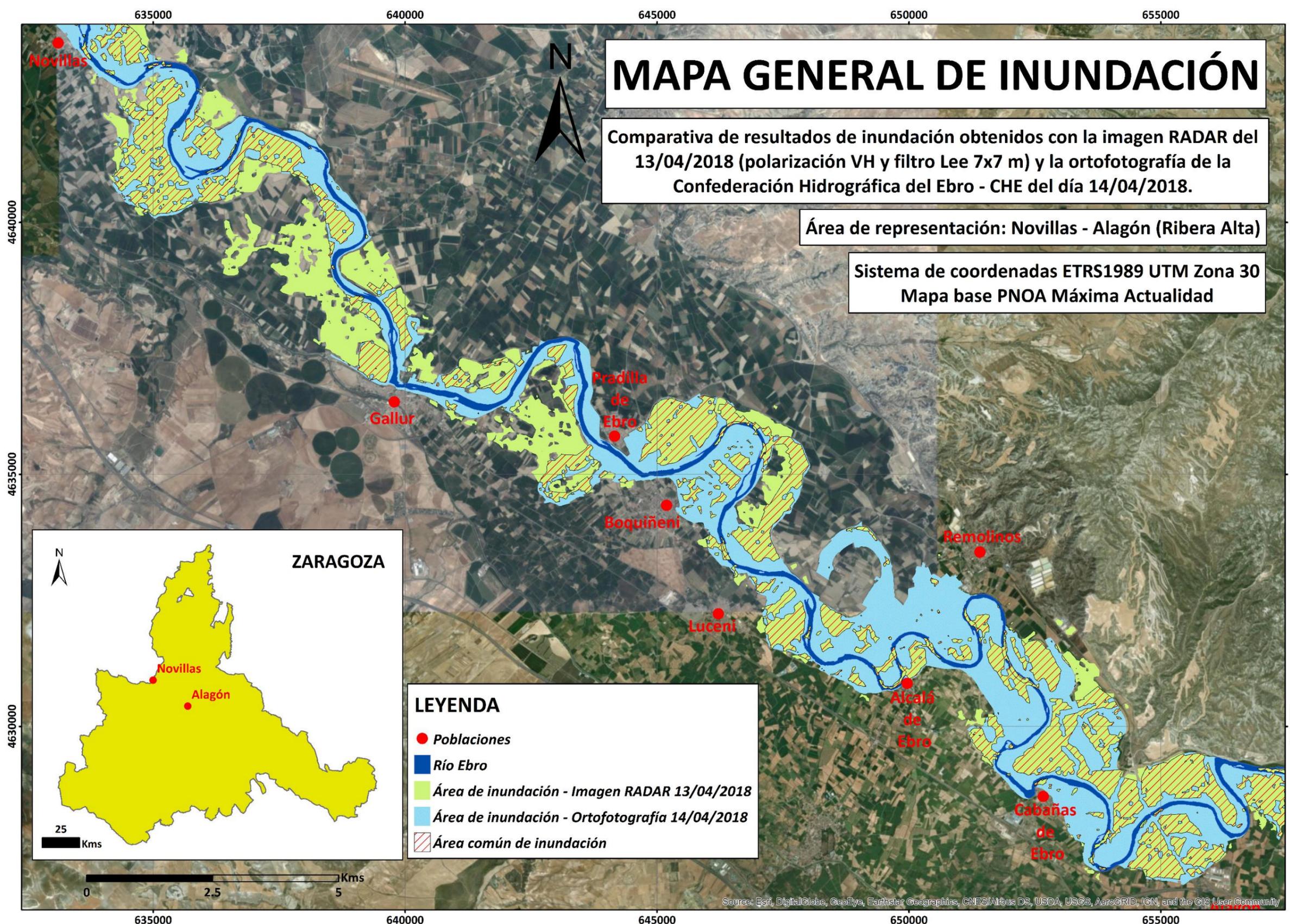
4. Mapa de general de inundación de toda la zona de estudio mediante composición RGB creado a partir de las imágenes RADAR del día 06/04/2018 y 13/04/2018, ambas en la polarización VH con un filtro Gamma Map 5x5 (m).



5. Mapa de general de inundación de toda la zona de estudio mediante umbrales de calibración creado a partir de la imagen RADAR del día 13/04/2018 y un depurado con la capa de aguas inundadas permanentemente.



6. Mapa general de inundación obtenido mediante fotointerpretación de las áreas inundadas con una ortofotografía aportada por la Confederación Hidrográfica del Ebro - CHE.



7. Mapa general de inundación comparativo entre la imagen RADAR del día 13/04/2018 y la ortofotografía aportada por la Confederación Hidrográfica del Ebro - CHE del día 14/04/2018.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ArcGIS Software versión 10.5.1. 2018. Acceso de descarga para estudiantes:
<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop-student-trial>

Ban, H.-J.; Kwon, Y.-J.; Shin, H.; Ryu, H.-S. y Hong, S. 2017. Flood monitoring using satellite-based RGB composite imagery and refractive index retrieval in visible and near-infrared bands. *Remote Sensing*. 9(4). 313.

Bhagat, V. 2017. Space-borne active microwave remote sensing of soil moisture: A review. *Remote Sensing of Land*. 1. 53-86.

Bioresita, F.; Puissant, A.; Stumpf, A. y Malet, J.-P. 2018. A method for automatic and rapid mapping of water surfaces from Sentinel-1 imagery. *Remote Sensing*. 10. 217.

Chapman, B.; McDonald, K.; Shimada, M.; Rosenqvist, A.; Schroeder, R.; Hess, L. 2015. Mapping regional inundation with spaceborne L-Band SAR. *Remote Sensing*, 7, 5440-5470.

Chuvieco Salinero, E. 2008. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. 3ª edición actualizada. Barcelona. *Ariel Ciencia*.

Clement, M.; Kilsby, C. y Moore, P. 2017. Multi-temporal SAR flood mapping using change detection. *Journal of Flood Risk Management*.

Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE. 2019. Acceso online:
<http://www.chebro.es/>

ESA - EnviSat ASAR Product Handbook. 2007. Acceso online:
https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ENVISAT/ASAR/asar.ProductHandbook.2_2.pdf

ESA, European Space Agency. Copernicus Open Access Hub. Servicio de

descarga de imágenes RADAR SAR. Disponible online: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (acceso desde diciembre de 2018 hasta mayo de 2019).

Ezzine, A., Darragi, F., Rajhi, H. y Ghatassi, A. 2018. Evaluation of Sentinel-1 data for flood mapping in the upstream of Sidi Salem dam (Northern Tunisia). *Arabian Journal Geosciences*. 11:170.

Galván Plaza, R. 2018. Cuatro grandes inundaciones históricas del Ebro en la ciudad de Zaragoza: 1643, 1775, 1871 y 1961. *Papeles de Geografía*, 64 pp. 7-25.

García, R.; González, C.; De la Vega, R.; Valverde, A. y Seben, E. 2003. Análisis del comportamiento de filtros de reducción de *speckle* en imágenes ERS2-SAR. *Teledetección y Desarrollo Regional. X Congreso de Teledetección. Cáceres, España. pp. 325-328.*

Henry, J.-B.; Chastanet, P.; Fellah, K. y Desnos, Y.-L. 2006. Envisat multipolarized ASAR data for flood mapping. *International Journal of Remote Sensing* 27(10):1921–1929.

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA. 2019. Acceso web: <http://www.inta.es>

Martinis, S., Twele, A. y Voigt, S. 2009. Towards operational near real-time flood detection using a split-based automatic thresholding procedure on high resolution TerraSAR-X data. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, 303-314.

Martinis, S.; Twele, A. y Voigt, S. 2011. Unsupervised extraction of flood-induced backscatter changes in SAR data using Markov image modeling on irregular graphs. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 49(1): 251-263.

National Remote and Sensing, NASA (2016). Applied Remote Sensing

Training, ARSET. Acceso web: <https://arset.gsfc.nasa.gov/>

Perrou, T., Garioud, A. y Parcharidis, I. 2018. Use of Sentinel-1 imagery for flood management reservoir-regulated river basin. *Frontiers of Earth Science*. 12: 506-520.

Podest, E. 2017. Conceptos básicos del Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar o SAR). NASA - ARSET (Applied Remote Sensing Training). Acceso web: <https://arset.gsfc.nasa.gov/>

Psomiadis, E. 2016. Flash flood area mapping utilising Sentinel-1 radar data. *Proceedings of the Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications VII 100051G*, Edimburgo, Reino Unido.

Pueyo Anchuela, Ó., Revuelto, C., Casas Sainz, A., Rajamo Cordero, J. y Pocovi, A. 2016. Las crecidas del Ebro de febrero/marzo de 2015. ¿Qué hemos aprendido y qué falta por aprender? *Geogaceta, Sociedad Geológica de España*. Número 60.

Sánchez Fabre, M.; Ballarín Ferrer, D.; Mora, D.; Ollero, A.; Serrano-Notivoli, R. y Saz, M. 2015. Las crecidas del Ebro medio en el comienzo del siglo XXI. *XXIV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles: Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación, 1853-1862*, Universidad de Zaragoza y Asociación de Geógrafos Españoles.

Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca Hidrográfica del Ebro (SAIH de la CHE). 2019. Acceso web: <http://www.saihebro.com/saihebro/index.php>

Senthilnath, J.; Handiru, V.; Rajendra, R.; Omkar, S. N.; Mani, V. y Diwakar, P. 2013. Integration of speckle de-noising and image segmentation using Synthetic Aperture Radar image for flood extent extraction. *Journal of Earth System Science*. 122: 559-572.

SNAP Software versión 6.0.0. (2018). Acceso de descarga web gratuita:
<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>

Tavus, B.; Kocaman, S.; Gokceoglu, C. y Nefeslioglu, H. A. 2018. Considerations on the use of Sentinel-1 data in flood mapping in urban areas: Ankara (Turkey) 2018 floods. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volumen XLII-5: 575-581.

Zhang, B.; Wdowinski, S.; Oliver-Cabrera, T.; Koirala, R.; Jo, M.J. y Osmanoglu, B. 2018. Mapping the extent and magnitude of severe flooding induced by hurricane Irma with multi-temporal Sentinel-1 SAR and InSAR observations. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volumen XLII-3: 2237-2244.