ESTUDIO DE LA SALINIDAD EN LOS SUELOS DEL DELTA DEL EBRO MEDIANTE IMÁGENES RADAR SAR (SENTINEL-1)

A STUDY OF THE SOIL SALINITY IN THE EBRO'S DELTA THROUGH RADAR SAR IMAGES (SENTINEL-1)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

María Rodrigo Viñuela

Dirigido por:

Dr. Francisco Carreño Conde (URJC)

Alcalá de Henares, a 24 de junio de 2021

ÍNDICE

RESUMEN 5

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS 6

Sentinel-1 9

Sentinel-2 10

2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL TRABAJO 11

2.1. Primeros pasos y elección de la fecha adecuada 12

2.2. Descarga de imágenes Sentinel-2 y Sentinel-1 en *Copernicus Open Access Hub* 13

2.3. Pre-procesado de imágenes Sentinel-1 en SNAP 14

2.4. Imágenes Sentinel-2. Cálculo del índice NDVI 16

2.5. Carga de imágenes y mapas en ArcGIS. Elección de parcelas 17

2.6. Procesado de las imágenes SAR Sentinel-1 20

2.7. Estadísticas de las parcelas. Gráficos 23

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS 24

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 29

5. BIBLIOGRAFÍA 31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El Delta del Ebro. 5
Figura 2. Campos de arroz en el Delta del Ebro en verano. (Foto: Joan Revillas). 6
Figura 3. Radiación emitida por el satélite radar SAR y radiación retrodispersada por la superficie terrestre (fuente: bibliotecacpa.org.ar). 8
Figura 4. Misión Sentinel-1 radar SAR (fuente: esa.int)..... 9
Figura 5. Bandas espectrales de Sentinel-2. (Fuente: gisandbeers.com)..... 10
Figura 6. Precipitaciones registradas en el Delta del Ebro desde enero a abril de 2019 (fuente: aemet.es)..... 12
Figura 7. Escogiendo imágenes Sentinel en Copernicus Open Access Hub..... 13
Figura 8. Solicitud de una imagen Sentinel-2 en Copernicus Open Access Hub..... 14
Figura 9. Coeficiente de retrodispersión de las polarizaciones VH y VV de Sentinel-1. 15
Figura 10. Índice NDVI en el área del Delta del Ebro..... 17
Figura 11. Imágenes Sigma_VH (coeficiente de retrodispersión de la polarización VH de Sentinel-1), índice NDVI (Sentinel-2) e imagen natural (GoogleEarth)..... 18
Figura 12. Elevación en metros sobre el delta del Ebro..... 19
Figura 13. Polígonos (en azul) escogidos sobre parcelas de cultivo de arroz. 19
Figura 14. Polarización horizontal VH y parcelas (polígonos azules). 20
Figura 15. Esquema de procesado de imágenes radar SAR en SNAP. 21
Figura 16. Coeficiente de retrodispersión VH con polígonos de parcelas en SNAP. 22
Figura 17. Coeficiente de retrodispersión VV con polígonos de parcelas en SNAP. 22
Figura 18. Ejemplos de los parámetros estadísticos obtenidos de las parcelas 9 y 11 con SNAP.. 23
Figura 19. Diagramas de caja y bigote de las estadísticas del coeficiente de retrodispersión para las polarizaciones horizontal y vertical en todas las parcelas..... 24
Figura 20. Mapa de elevación sobre el nivel del mar con las parcelas. Las parcelas con valor de retrodispersión radar SAR mayor de 0,01 se muestran en color rojo..... 25
Figura 21. Mapa de la salinidad con las parcelas con valor de retrodispersión radar SAR más destacada (fuente: Ph. D. Thesis 2017, Ana Genua Olmedo). 26
Figura 22. Relación de la retrodispersión VH y VV con la salinidad..... 27
Figura 23. Relación de la retrodispersión VH con la salinidad (sin la parcela 28). 27
Figura 24. Relación de la retrodispersión VV con la salinidad (sin la parcela 28). 28

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CE: Comisión Europea

ESA: European Space Agency

ETRS89: European Terrestrial Reference System 1989

Eumetsat : Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos

GRD: Ground Range Detected

GHz: GigaHertz

IGN: Instituto Geográfico Nacional

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IRTA: Recerca i Tecnologies Agroalimentaries

MSIL1C: MultiSpectral Instrument Level 1-C

NDVI: Normalize Difference Vegetation Index

NIR: Near InfraRed

SAR: Synthetic Aperture radar

UTM: Universal Transverse Mercator

WGS84: World Geodetic System 1984

RESUMEN

Desde hace pocos años, la teledetección ha adquirido un papel protagonista en muchos ámbitos de estudio, dado que es capaz de proporcionar gran cantidad de datos en el instante deseado, a menudo cedidos sin coste alguno al usuario final. Estos datos proporcionan información directa e indirecta de muchos parámetros relacionados con la superficie del planeta. En esta memoria se detalla un estudio para relacionar la salinidad del suelo con la señal de retrodispersión registrada por un satélite de radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés *synthetic aperture radar*), el satélite de la misión Copernicus Sentinel-1.

La salinidad de las tierras del Delta del río Ebro es un problema para los cultivos de arroz predominantes en la zona, pudiendo arruinar la cosecha anual. Si los agricultores supieran a priori cual es la salinidad del suelo, o cuales son las parcelas con mayor índice de salinidad, podrían hacer un mejor uso de sus recursos o incluso descartar las parcelas más salinas.

Las campañas de medición en tierra de parámetros como la salinidad son costosas en tiempo y dinero. Dado que los datos de teledetección del programa Copernicus son de libre disposición para los ciudadanos europeos, resultaría muy conveniente utilizarlos para encontrar un nexo con la salinidad de los suelos. El presente estudio ha encontrado una relación lineal bastante robusta entre la señal registrada por el satélite y la salinidad de los suelos del Delta del Ebro.

Figura 1. El Delta del Ebro.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El Delta del Ebro en España es una zona prácticamente llana de gran importancia agrícola donde predomina mayoritariamente el cultivo de arroz. Las amenazas a las que se enfrenta esta zona de altísimo valor ecológico son variadas. Entre ellas se encuentra la subida paulatina del nivel del mar, debido tanto a la subida absoluta del nivel medio del mar como a la subsidencia del propio delta. La topografía de la zona es tan baja que las inundaciones pueden llegar a cubrir casi por entero su extensión. En segundo lugar, debido a la construcción de nuevas presas en los últimos años, el aporte de sedimentos en el tramo final del río Ebro es cada vez más escaso, dado que las presas impiden que los sedimentos puedan abrirse paso naturalmente aguas abajo hacia el mar Mediterráneo. Como tercera amenaza, aunque existen más peligros potenciales, en lo que atañe al objeto de este estudio, cabe citar la elevada salinidad de las tierras de cultivo en el área. Todos estos problemas ponen en riesgo el futuro del Delta del Ebro, provocando cambios físicos y ecológicos (IPCC 2007), pero también afectará económicamente a la vulnerabilidad de las comunidades costeras (Nicholls 2010).

Figura 2. Campos de arroz en el Delta del Ebro en verano. (Foto: Joan Revillas).

Esta vulnerabilidad es especialmente cierta en el caso de las tierras de cultivo. En los últimos años, todas las parcelas de arroz van al unísono en el ciclo de tareas agrícolas. La campaña de cultivo se extiende desde el mes de abril hasta septiembre, momento en el que se recoge el arroz. A partir de ese momento, en otoño, se permite la libre circulación del agua del río por toda la red de canales y se produce la inundación de todas las parcelas del delta. En

diciembre se abren las compuertas permitiendo la salida de toda el agua embalsada y las parcelas se empiezan a secar. A finales de febrero, si no ha llovido, es el momento en que las parcelas están más secas. A partir de este momento comienzan los trabajos de preparación de la tierra previos a la siembra de abril.

Es precisamente este momento, finales de febrero, cuando las parcelas están más secas y aún sin cultivo, el más adecuado para nuestro estudio. Elegimos estas fechas para tomar imágenes de teledetección de satélite radar.

Un satélite radar de apertura sintética posee una fuente de radiación electromagnética propia con la que ilumina la Tierra. En la superficie terrestre, parte de la energía incidente se absorbe, parte se transmite y parte se refleja. La suma de estos tres fenómenos es equivalente a la energía incidente o, lo que es lo mismo, la suma de los coeficientes de absorción (o absorbancia), de transmisión (o transmitancia) y de reflexión (o reflectancia) es igual a uno:

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

donde:

- $\alpha = Energía\ absorbida/Energía\ incidente$ = coeficiente de absorción o absorbancia
- $\tau = Energía\ transmitida/Energía\ incidente$ = coeficiente de transmisión o transmitancia
- $\rho = Energía\ reflejada/Energía\ incidente$ = coeficiente de reflexión o reflectancia

De toda la energía reflejada solamente parte de ella llega de nuevo al satélite. La radiación electromagnética que detecta el sensor del satélite viene dada por el coeficiente de dispersión o retrodispersión (*backscattering*) y con él se forman las imágenes que luego estarán disponibles para los usuarios finales. Este parámetro, que se traduce en diferentes tonos de gris en la imagen, depende de muchos factores como son la vegetación, la rugosidad del suelo, la temperatura, la humedad, la salinidad, etcétera.

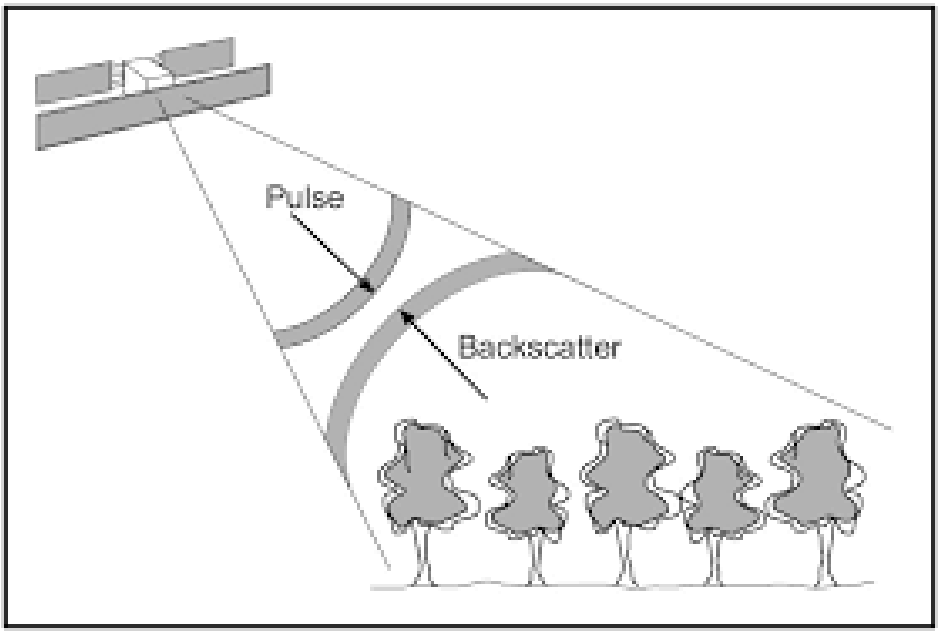

Figura 3. Radiación emitida por el satélite radar SAR y radiación retrodispersada por la superficie terrestre (fuente: bibliotecacpa.org.ar).

El objetivo de este estudio es establecer la relación de la imagen de teledetección con la salinidad de las parcelas en ese momento. Conocer la salinidad de cada una de las parcelas puede resultar muy útil para los agricultores a la hora de la siembra para tomar decisiones.

Las imágenes radar que se pueden obtener corresponden a cada una de las polarizaciones horizontal y vertical del coeficiente de retrodispersión que el sensor del radar del satélite es capaz de captar. Las polarizaciones dependen de la naturaleza del objeto reflejado. Como resalta A. J. Zozaya (2016) en su artículo *Synthetic aperture radars: conceptual design procedure* "un bosque de árboles con gran desarrollo vertical responderá más intensamente a una polarización vertical que a una horizontal. De esta forma, si queremos llegar al suelo, convendrá una polarización horizontal, y si queremos detectar el bosque, una vertical". En nuestro caso, como veremos al final, tanto la polarización vertical como la horizontal provocarán una respuesta positiva en lo referente a la relación con la salinidad del suelo.

Las imágenes radar que se han utilizado en este estudio han sido generadas por los satélites Sentinel-1 y Sentinel-2, ambos pertenecientes al Programa Europeo de Observación de la Tierra Copernicus. Este programa es coordinado y gestionado por la Comisión Europea (CE) y en su ejecución colaboran los Estados miembros y, entre otros, la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos

(Eumetsat). El programa Copernicus proporciona información que ayuda a las empresas, las administraciones públicas y organizaciones internacionales a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. Sus servicios de información son de acceso gratuito y abierto para sus usuarios, con la única condición de registrarse al inicio, lo cual posibilita todo tipo de trabajos de investigación, incluido el que nos ocupa.

Figura 4. Misión Sentinel-1 radar SAR (fuente: esa.int).

De los seis satélites Sentinel gestionados por la ESA y Eumetsat, aquí se han utilizado las imágenes de Sentinel-1 y Sentinel-2.

Sentinel-1

Como se puede leer en la página web *sentinel.esa.int*, la misión europea Sentinel-1 está compuesta de dos satélites idénticos radar SAR de órbita polar separados 180 grados, que operan día y noche cubriendo toda la superficie terrestre sin importar las condiciones meteorológicas. Utilizaremos imágenes de Sentinel-1 para relacionarlas con la salinidad del suelo en nuestra región de interés, el Delta del Ebro.

Los productos o imágenes de la misión Sentinel-1 están disponibles desde el año 2014. Las frecuencias de radiación emitidas por los satélites Sentinel-1 son microondas que se

encuentran en el rango de la banda C, en concreto en la frecuencia 5,4 GHz. La resolución espacial es de 5 m x 20 m. Las imágenes disponibles son dobles polarizaciones vertical-vertical y vertical-horizontal (VV y VH) u horizontal-vertical y horizontal-vertical (HH y HV).

Sentinel-2

La misión europea Sentinel-2 en cambio no está compuesta de satélites radar (no tiene una fuente de radiación activa propia), sino que sus sensores son ópticos o multiespectrales, es decir, recogen la radiación reflejada por la Tierra a partir de radiación incidente principalmente generada por el Sol. En este caso, las nubes sí condicionan la cobertura visual y se requiere su ausencia para tener una imagen óptima.

Los satélites Sentinel-2 llevan una carga instrumental óptica que muestrea 13 bandas espectrales. Cuatro de estas bandas tienen una resolución espacial de 10 metros, seis bandas tienen resolución espacial de 20 metros y tres bandas poseen 60 metros de resolución espacial.

	SENTINEL 2	
	Longitud de onda (µm)	Resolución (m)
Banda 1 - Aerosol	0,43 - 0,45	60
Banda 2 - Blue	0,45 - 0,52	10
Banda 3 - Green	0,54 - 0,57	10
Banda 4 - Red	0,65 - 0,68	10
Banda 5 - Red edge 1	0,69 - 0,71	20
Banda 6 - Red edge 2	0,73 - 0,74	20
Banda 7 - Red edge 3	0,77 - 0,79	20
Banda 8 - Near Infrared (NIR) 1	0,78 - 0,90	10
Banda 8A - Near Infrared (NIR) 2	0,85 - 0,87	20
Banda 9 – Water vapour	0,93 - 0,95	60
Banda 10 - Cirrus	1,36 - 1,39	60
Banda 11 - SWIR 1	1,56 - 1,65	20
Banda 12 - SWIR 2	2,10 - 2,28	20

Figura 5. Bandas espectrales de Sentinel-2. (Fuente: gisandbeers.com).

También esta misión está compuesta por dos satélites idénticos en órbita heliosíncrona o polar separados 180 grados para lograr cobertura total. Las imágenes de Sentinel-2, como veremos más adelante, servirán para escoger las parcelas con menos vegetación.

En las dos últimas décadas se han hecho muchos intentos para medir la salinidad del suelo con métodos de teledetección. A pesar de algunos avances al relacionar la salinidad con el índice de vegetación utilizando imágenes de satélites ópticos, la presencia de las nubes hace que experimentar con este tipo de satélites se haya visto relegada en favor del uso de imágenes radar SAR. El coeficiente de retrodispersión de las polarizaciones vertical-vertical (VV) y vertical-horizontal (VH) que se obtienen del satélite Sentinel-1 están relacionados con la salinidad y la humedad (Taghadosi et al, 2018). Según Hoa et al, (2019) la retrodispersión está directamente relacionada con la constante dieléctrica del suelo. Esta constante dieléctrica posee parte real y parte imaginaria, al igual que la fase y la intensidad de la energía retrodispersada que llega al satélite. La parte imaginaria de la constante dieléctrica se relaciona con la energía absorbida por el suelo y se llama factor de pérdida (*loss factor*) (Horikoshi, 2018). Cuanto mayor es la energía absorbida, menor será el coeficiente de retrodispersión. En consecuencia, se puede utilizar el factor de pérdida (*loss factor*) para medir la salinidad. Lo ideal entonces es utilizar frecuencias bajas como banda L o banda C. Lasne et al, (2008) confirmó que, para el rango de frecuencias entre 1 y 7 GHz, entre las que se encuentra la de Sentinel-1 en banda C, 5,404 GHz, la parte imaginaria es sensible a la salinidad, estando la parte real más relacionada con la humedad. Por esta razón, las imágenes radar son el instrumento idóneo a la hora de medir la salinidad del suelo en ciertas zonas.

Así pues, considerando un momento temporal en el que las parcelas no tengan humedad, a igualdad del resto de parámetros que podrían influenciar una respuesta diferente de la retrodispersión, el objetivo de este trabajo es obtener la relación retrodispersión-salinidad con las imágenes del satélite Sentinel-1.

2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL TRABAJO

Para conseguir relacionar las imágenes del satélite Sentinel-1 con la salinidad de las parcelas del Delta del Ebro, el plan de trabajo se desarrolló como sigue:

2.1. Primeros pasos y elección de la fecha adecuada

Al inicio del trabajo y una vez estuvo claro el objetivo, se hizo evidente la necesidad de contar con datos de campo. Conocer la salinidad de las parcelas era prioritario para saber si habría correlación con las imágenes de satélite o no. La búsqueda de esta información derivó en varias conversaciones con investigadores de Recerca i Tecnologies Agroalimentaries (IRTA). En estas reuniones se explicó el proceso del cultivo del arroz que siguen los agricultores del Delta del Ebro desde hace muy pocos años.

A raíz de la plaga del caracol-manzana, desde el año 2017, las parcelas se dejan secar en invierno. A partir de diciembre, se libera toda el agua retenida abriendo las compuertas del delta y empieza el secado de la tierra. Si no llueve o llueve muy poco, las parcelas estarán totalmente secas a finales de febrero o marzo. En marzo las tierras se laborean, de manera que la "rugosidad" o aspereza de cada parcela puede ser diferente. A principios o mediados de abril todas las tierras están secas, trabajadas y niveladas con láser, es decir, todas bastante homogéneas. Este sería el momento ideal, pero, revisando la lluvia de los últimos tres años en el delta, se aprecian lluvias en marzo y abril, con lo que finalmente se escogió finales de febrero del año 2019.

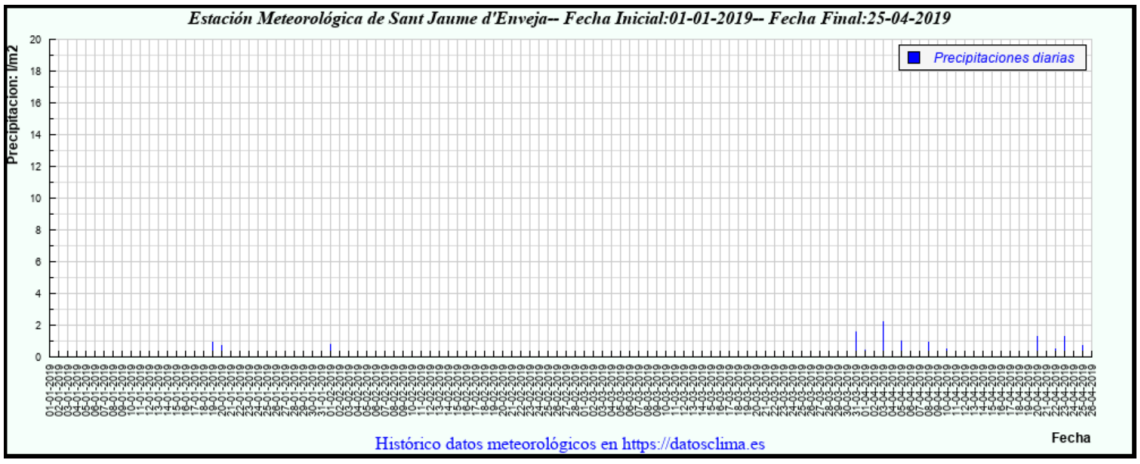

Figura 6. Precipitaciones registradas en el Delta del Ebro desde enero a abril de 2019 (fuente: aemet.es).

La fecha elegida se encuentra entonces a finales de febrero de 2019. El día exacto lo condiciona la disponibilidad de imágenes satélite.

2.2. Descarga de imágenes Sentinel-2 y Sentinel-1 en *Copernicus Open Access Hub*

Copernicus Open Access Hub es el lugar para la descarga de imágenes de los satélites Sentinel. La descarga de las imágenes es completamente libre y gratuita, ni siquiera es necesario pertenecer a una empresa o universidad. El único requisito es registrarse al inicio.

Una vez ubicado el Delta del Ebro y acotando las fechas deseadas, aparecen las imágenes sobre el mapa y se pueden elegir las deseadas.

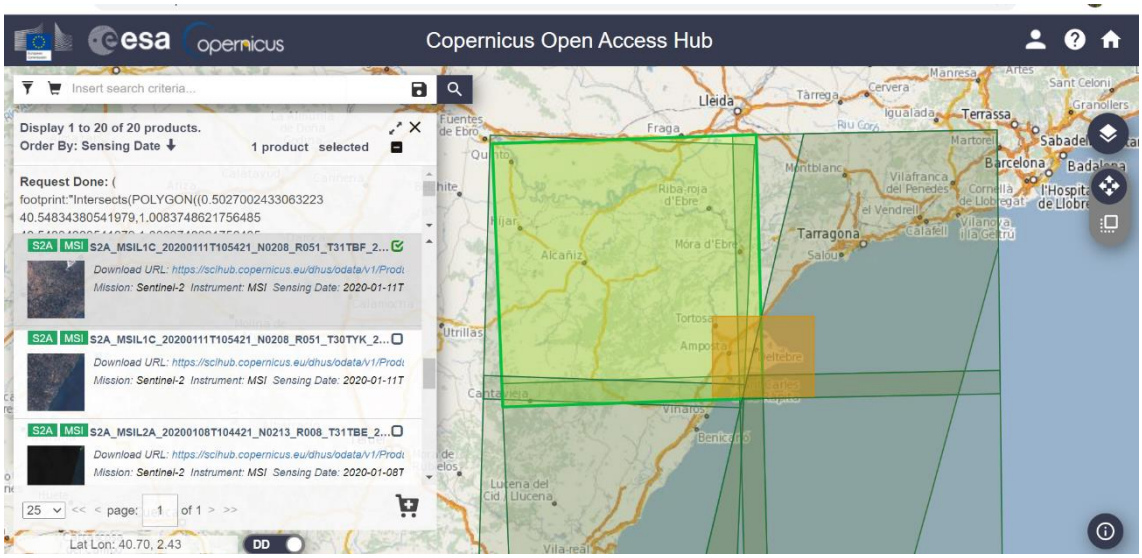

Figura 7. Escogiendo imágenes Sentinel en Copernicus Open Access Hub.

A menudo las imágenes no abarcan enteramente el área de interés y es necesario bajar más de una imagen. Tanto en el caso de Sentinel-1 (radar SAR) como Sentinel-2 (óptico), hay varios productos (tipos de imagen) disponibles. En nuestro caso elegimos para Sentinel-1, imágenes tipo GRD y para Sentinel2, imágenes tipo MSIL1C.

La fecha escogida para este estudio fue el 25 de febrero de 2019, puesto que en ese momento había disponibilidad de imágenes tanto de Sentinel-1 como de Sentinel-2. Los productos de Sentinel-1 se necesitan para hacer la comparación de la retrodispersión con la salinidad de las parcelas de cultivo. Los productos de Sentinel-2 son necesarios para escoger las parcelas con menos vegetación, aunque como ya sabemos, a finales de febrero todas las parcelas

estarán sin vegetación y muy secas, lo que será clave para que el único parámetro susceptible de ser diferente entre ellas sea la salinidad.

Las imágenes del último año están disponibles en tiempo real en *Copernicus Open Access Hub*, pero en nuestro caso, al transcurrir más de un año de antigüedad (febrero de 2019), algunas imágenes no estaban en línea y hubo que solicitarlas. La petición se hace dentro de la misma aplicación y la imagen tarda unos dos o tres días en estar disponible en línea. El proceso es sencillo.

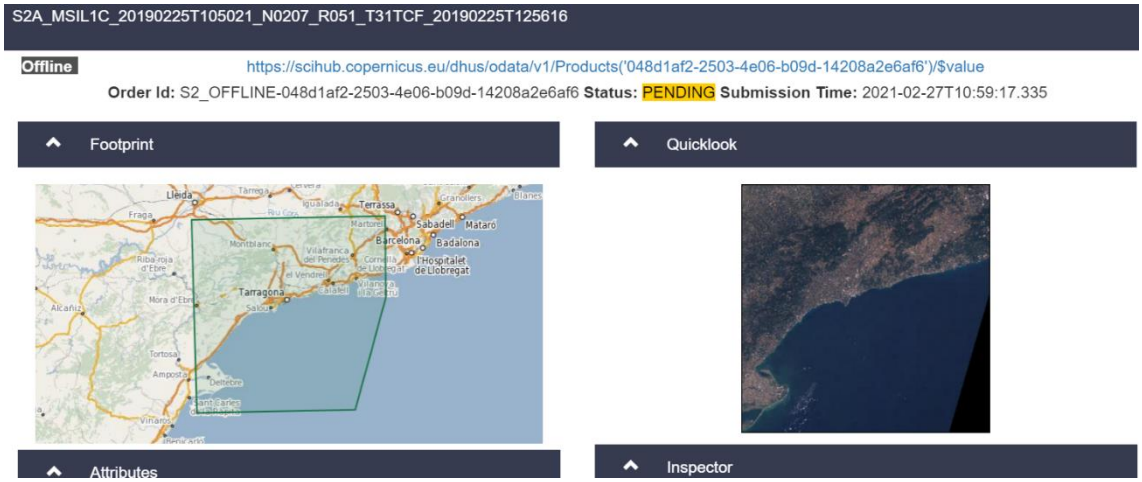

Figura 8. Solicitud de una imagen Sentinel-2 en Copernicus Open Access Hub.

2.3. Pre-procesado de imágenes Sentinel-1 en SNAP

Las imágenes Sentinel-1 deben ser pre-procesadas una vez descargadas. Esto se hace con el software SNAP, también perteneciente a la ESA. En este caso también el software es gratuito y de libre disposición y con él se pueden analizar y procesar las imágenes Sentinel.

El pre-procesado de las imágenes Sentinel-1 sigue los pasos siguientes:

- Subset: la imagen se recorta en la zona de interés. Se escoge el rango de píxeles deseado en el eje X y en el eje Y.

- Calibración radiométrica: las distorsiones radiométricas obedecen a mecanismos que alteran los valores de brillo en los pixeles. Se deben fundamentalmente a interferencias atmosféricas y a desajustes de la instrumentación.

- Reducir el *speckle*: el *speckle* es un efecto que tienen las imágenes radar como "sal y pimienta" debido a la interacción de las microondas con la superficie terrestre. Al mitigarlo se reduce la resolución de la imagen con lo que su elección compromete la calidad de la imagen.

- Calibración geométrica: para efectuarla se utiliza un modelo de elevación digital. La imagen corregida se sitúa en su orientación correcta y los píxeles son cuadrados, es decir, la imagen está ortorrectificada.

- Convertir la retrodispersión polarizada a decibelios: consiste en pasar de escala lineal a logarítmica en decibelios.

Las imágenes de las polarizaciones VH y VV resultantes se pueden ver en la Figura 9:

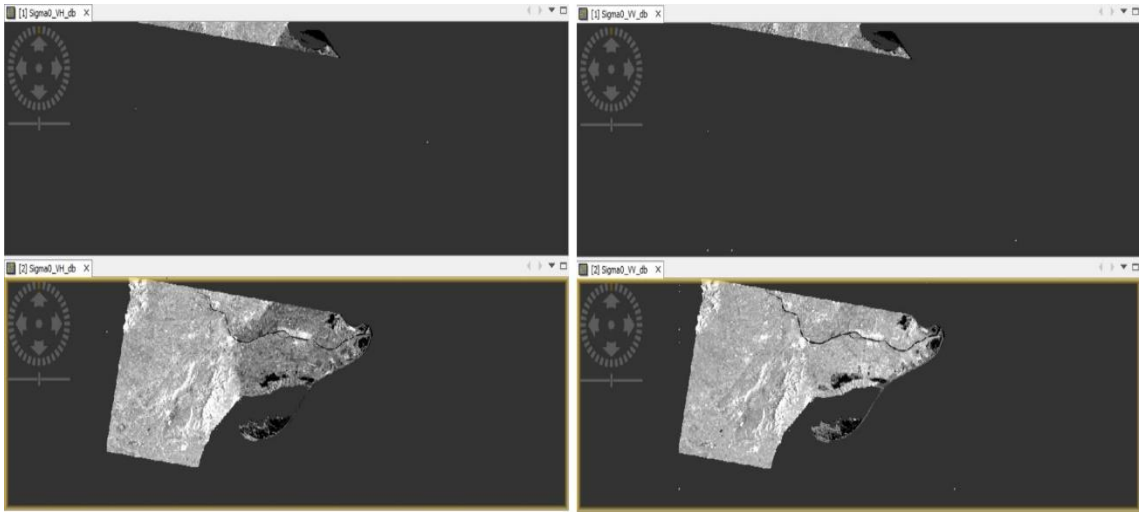

Figura 9. Coeficiente de retrodispersión de las polarizaciones VH y VV de Sentinel-1.

Como se puede observar, para abarcar la zona del Delta del Ebro, se han tenido que escoger dos imágenes Sentinel-1.

Las imágenes SAR proporcionan información sobre la estructura de la superficie y sobre las propiedades dieléctricas de la superficie. Una superficie aparecerá lisa si su longitud de onda es mucho menor que la longitud de onda de la señal del radar. La constante dieléctrica es una medida de la reflectividad y de la conductividad de la superficie. Influye en la intensidad de la señal retrodispersada (Taghadosi, 2018).

Los parámetros que afectan a la constante dieléctrica son el contenido en humedad y la conductividad iónica, esta última está relacionada a su vez con la salinidad. Cuanto más húmeda está la superficie, mayor es la reflectividad y más brillante se verá la imagen. Cuanto más seca, al contrario, más penetrará la energía del radar y menos se reflejará, más oscura aparecerá la superficie.

Al considerar que la superficie del Delta está muy seca a finales de febrero, el parámetro principal del que depende la reflectividad es la conductividad y, por ende, de la salinidad.

2.4. Imágenes Sentinel-2. Cálculo del índice NDVI

Las imágenes de Sentinel-2 son necesarias para saber cuánta vegetación existe en las parcelas.

Se procede a la carga en SNAP de las imágenes de Sentinel-2 obtenidas de *Copernicus Open Access Hub* tal cual fueron abtenidas, con su extensión *zip*. Una vez cargadas podemos asignar a tres de sus trece bandas cada uno de los canales rojo, verde o azul para visualizar la imagen. Las combinaciones “natural” o “falso color” por ejemplo mostrarán vistas distintas de la imagen.

Existen diferentes índices para realzar diferentes parámetros. En concreto, para realzar la vegetación, uno de los índices más eficaces y utilizados es el índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI, por sus siglas en inglés:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

donde:

- NIR corresponde al infrarrojo cercano y
- R corresponde al rojo

En la imagen de Sentinel-2 asignamos a NIR la banda B8 y a R la banda B4 y, utilizando una paleta de colores adecuada, el mapa resaltará las zonas con mayor abundancia de vegetación.

De nuevo tenemos dos imágenes Sentinel-2 para abarcar el Delta del Ebro (Figura 10):

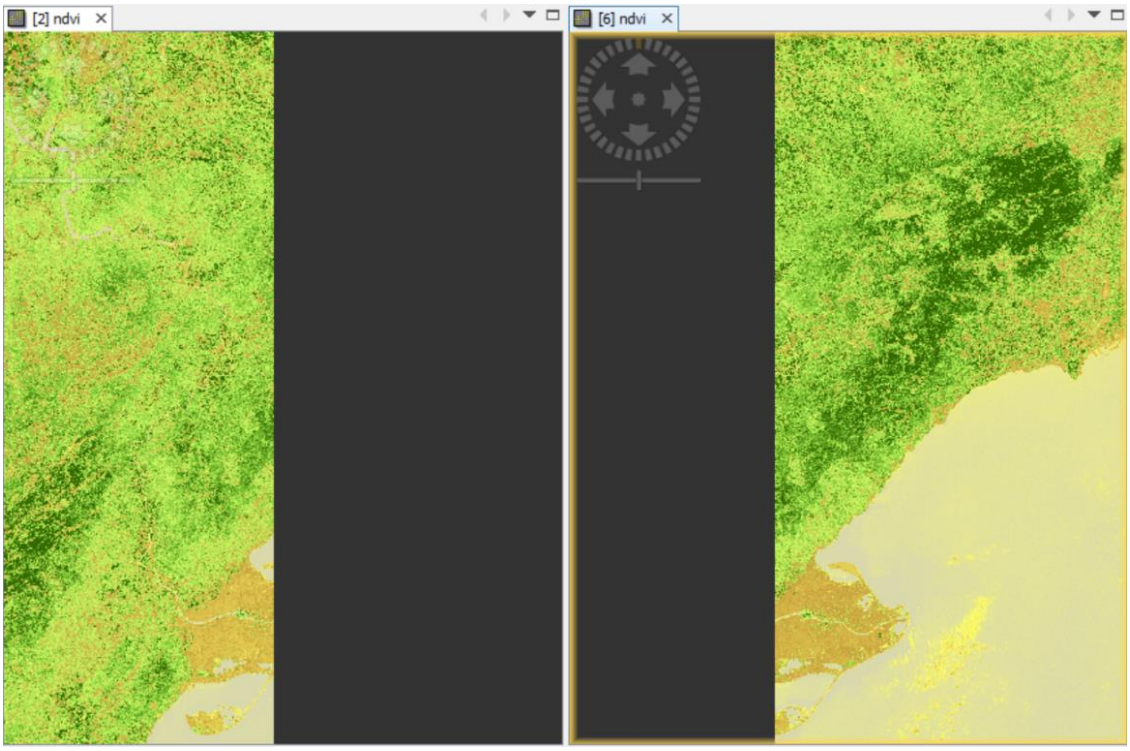

Figura 10. Índice NDVI en el área del Delta del Ebro.

2.5. Carga de imágenes y mapas en ArcGIS. Elección de parcelas

Se prepara un proyecto en ArcGIS que incluya las imágenes obtenidas de Sentinel-1 y Sentinel-2, además de una imagen de la zona a partir de Google Earth.

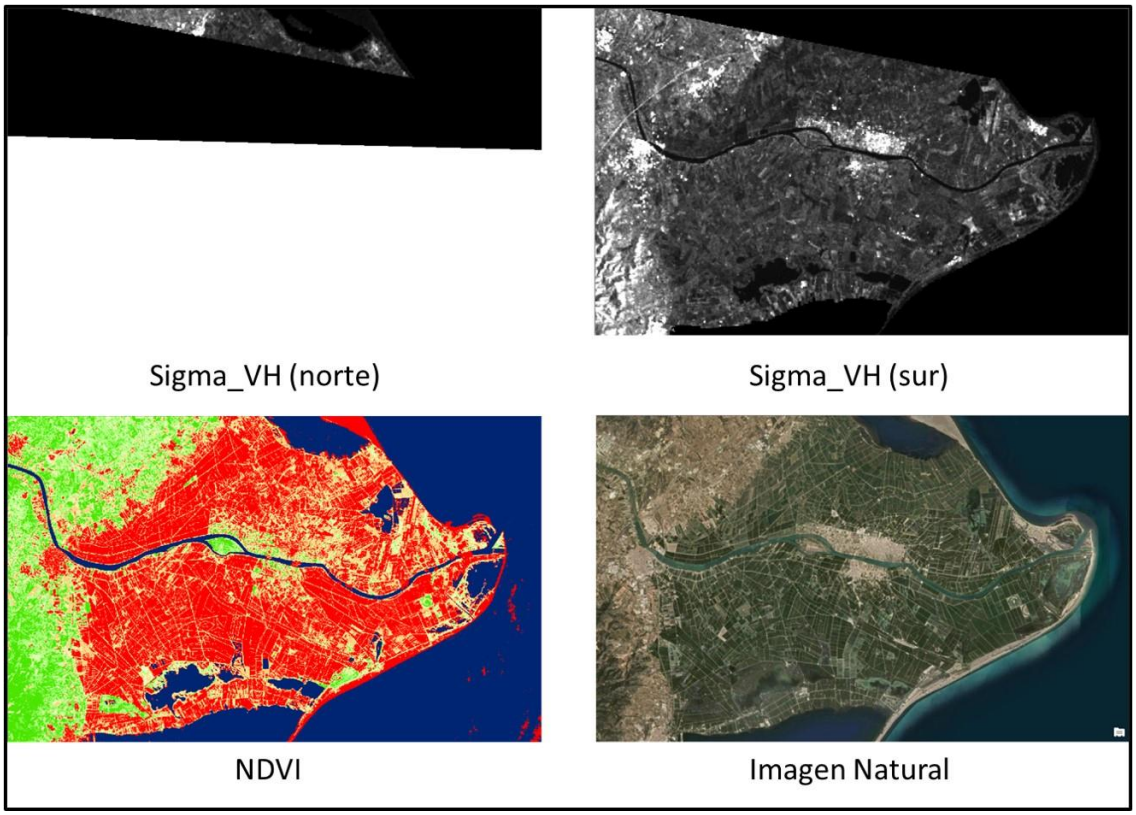

Figura 11. Imágenes Sigma_VH (coeficiente de retrodispersión de la polarización VH de Sentinel-1), índice NDVI (Sentinel-2) e imagen natural (GoogleEarth).

A su vez, se cargan también los mapas de elevación de la zona obtenidos de la página del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Este proyecto ArcGIS se enmarca en el sistema de referencia WGS84, proyección UTM 31. Como los mapas del IGN están referenciados al sistema de referencia ETRS89, primero se debe generar en ArcGIS un marco en ETRS89 e importar los mapas, que son cinco en total. Se crea un nuevo raster mosaico para englobar los 5 mapas en uno solo y se georeferencia al datum general WGS84, proyección UTM 31. Los colores de la escala del mapa resultante se adecuan para plasmar los cambios en la elevación del terreno.

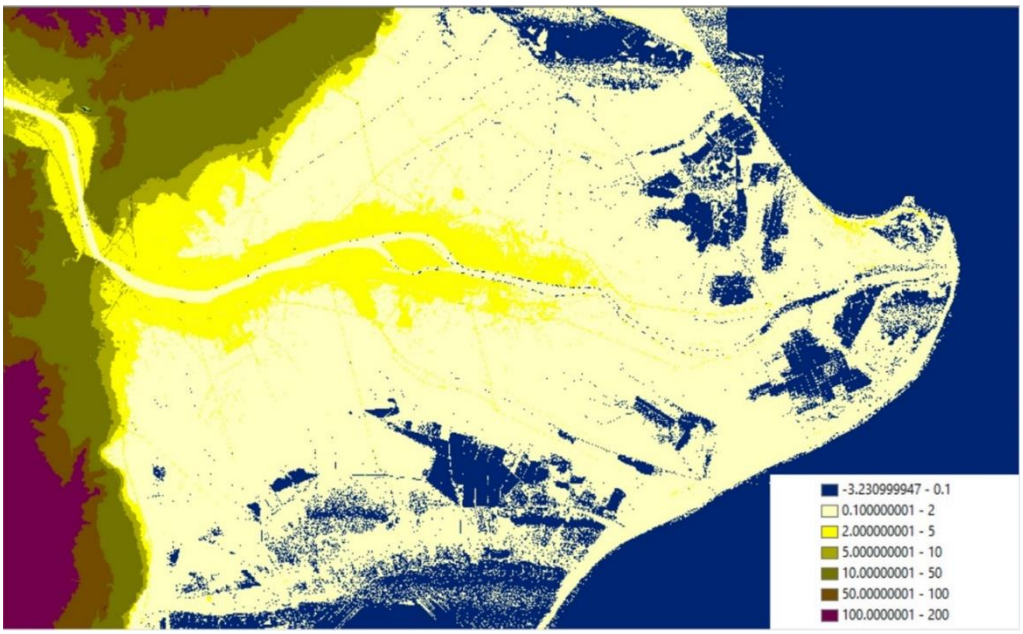

Figura 12. Elevación en metros sobre el delta del Ebro.

En el mapa de elevación se puede observar que el Delta del Ebro es una superficie prácticamente llana con topografía muy baja, donde la mayor extensión no sube por encima de dos metros sobre el nivel del mar.

Una vez que todo está preparado, se procede a elegir las parcelas de cultivo de arroz lo más homogéneas posible a partir de todos los mapas e imágenes disponibles.

Figura 13. Polígonos (en azul) escogidos sobre parcelas de cultivo de arroz.

Se crean un total de 29 polígonos (parcelas) de los que se tratará de extraer el valor del coeficiente de retrodispersión de las imágenes Sentinel-1. Pero primero se debe hacer el procesado de las imágenes, éste es el paso siguiente.

2.6. Procesado de las imágenes SAR Sentinel-1

En el proyecto ArcGIS se observa que la mayoría de las parcelas escogidas (excepto una) se localizan en la imagen SAR del sur. Con esta imagen entonces, *subset* de la imagen primera, es con la que se va a trabajar.

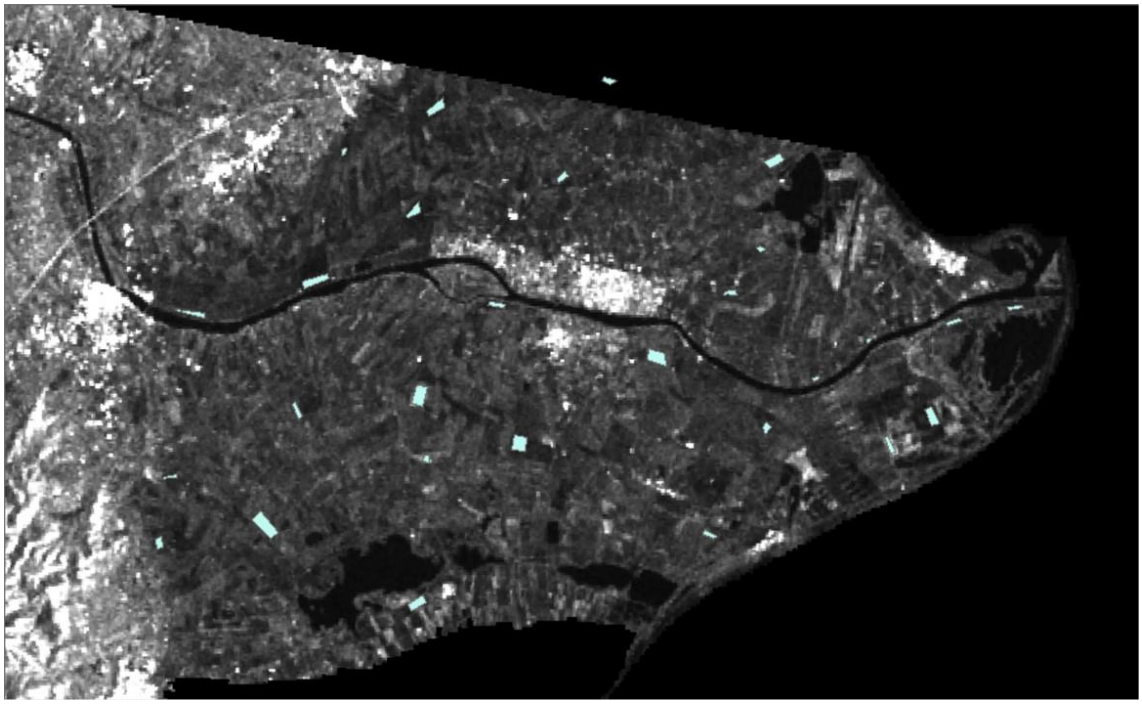

Figura 14. Polarización horizontal VH y parcelas (polígonos azules).

Se utilizará de nuevo el programa SNAP para el procesado de la imagen SAR y para extraer después el valor del coeficiente de retrodispersión en las parcelas. El esquema de procesado que se va a seguir es el de la Figura 15. Primero se define y luego se aplica cada paso con sus parámetros. Los pasos son:

1) Se toma el *raster subset* con el que se va a trabajar. Sobre él se harán todas las correcciones posteriores.

2) *Orbit-file*: corrige los parámetros de la órbita del satélite. En nuestro caso se dejan los parámetros por defecto.

3) *Thermal Noise Removal*: se elimina el ruido térmico.

4) *Radiometric Calibration*: debido a interferencias atmosféricas y a la instrumentación, es necesario corregir los valores de brillo en los píxeles. En nuestro caso no es necesario cambiar ningún parámetro, ya que por defecto muestra "output sigma0 band".

5) Filtro *Speckle*: el efecto *Speckle* es inherente a las imágenes radar SAR debido a la interacción de la radiación SAR con la supercie terrestre. El filtro aplicado reducirá a su vez la resolución de la imagen.

6) *Terrain Correction*: se adjudica el sistema de referencia (WGS84, UTM 31)

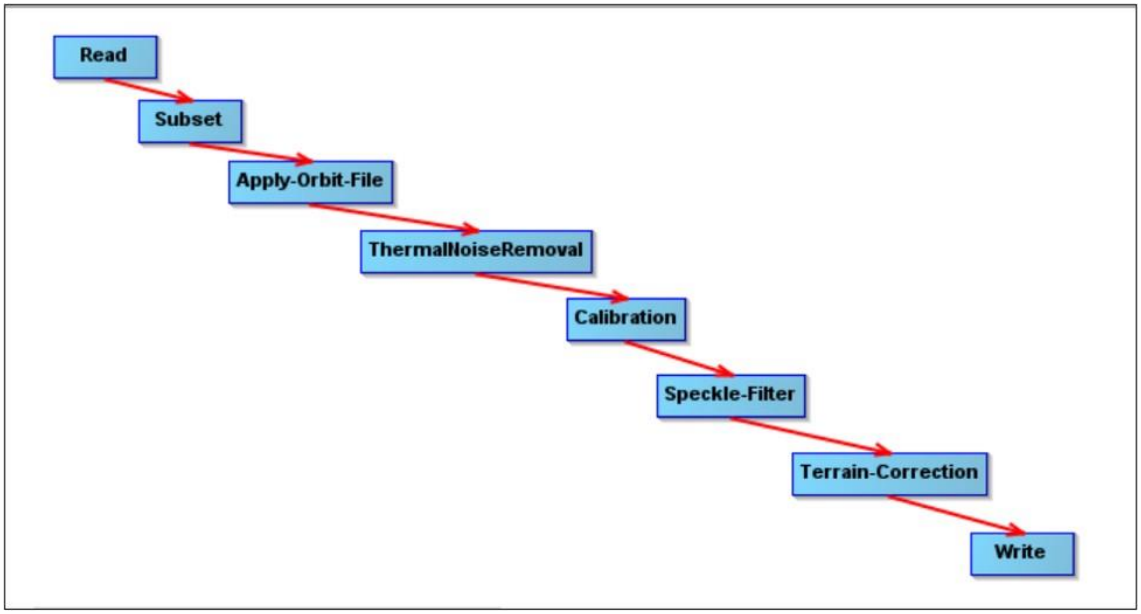

Figura 15. Esquema de procesado de imágenes radar SAR en SNAP.

Se efectúan las correcciones para las dos polarizaciones vertical-horizontal y vertical-vertical y, una vez hechas, se importan a SNAP los polígonos de las parcelas que se generaron en ArcGIS. Se importan a SNAP como tipo *vector*.

Se tienen entonces las parcelas en las dos polarizaciones del coeficiente de retrodispersión, como muestran las Figuras 16 y 17.

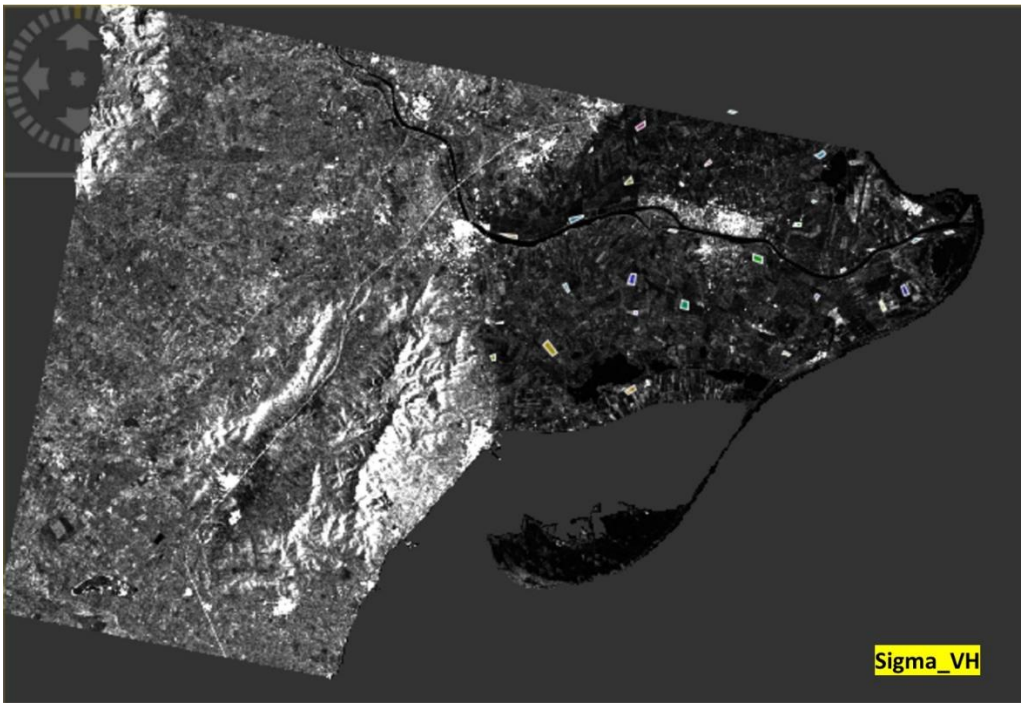

Figura 16. Coeficiente de retrodispersión VH con polígonos de parcelas en SNAP.

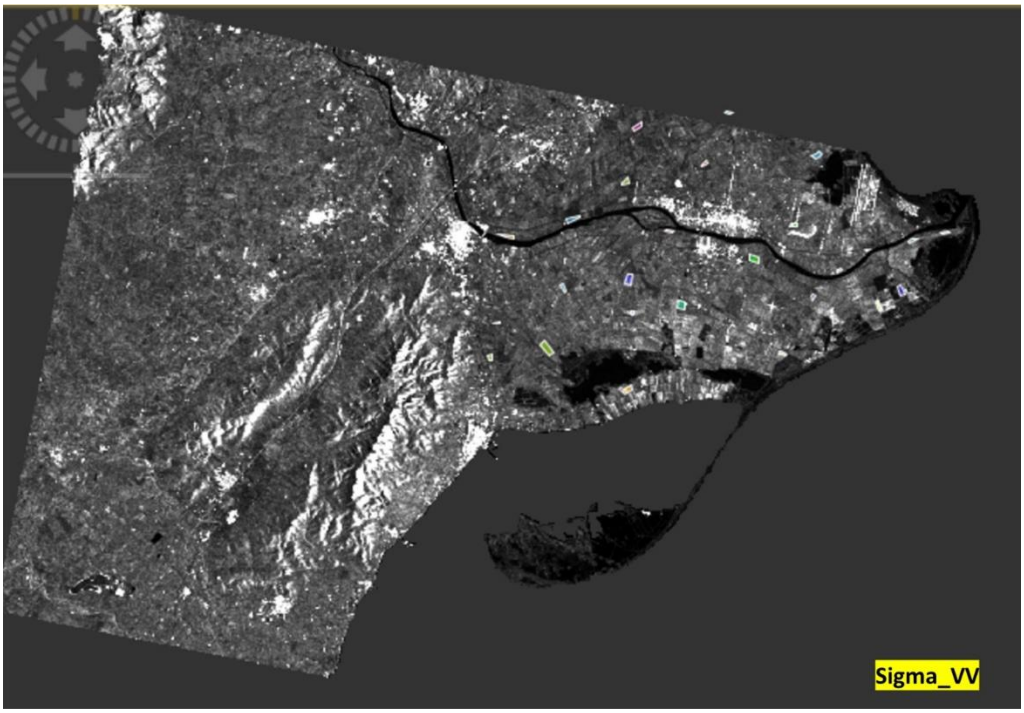

Figura 17. Coeficiente de retrodispersión VV con polígonos de parcelas en SNAP.

2.7. Estadísticas de las parcelas. Gráficos

Ahora ya es posible extraer el valor del coeficiente de retrodispersión en cada parcela. Se hace de manera sencilla con el comando de análisis *Statistics* del programa SNAP.

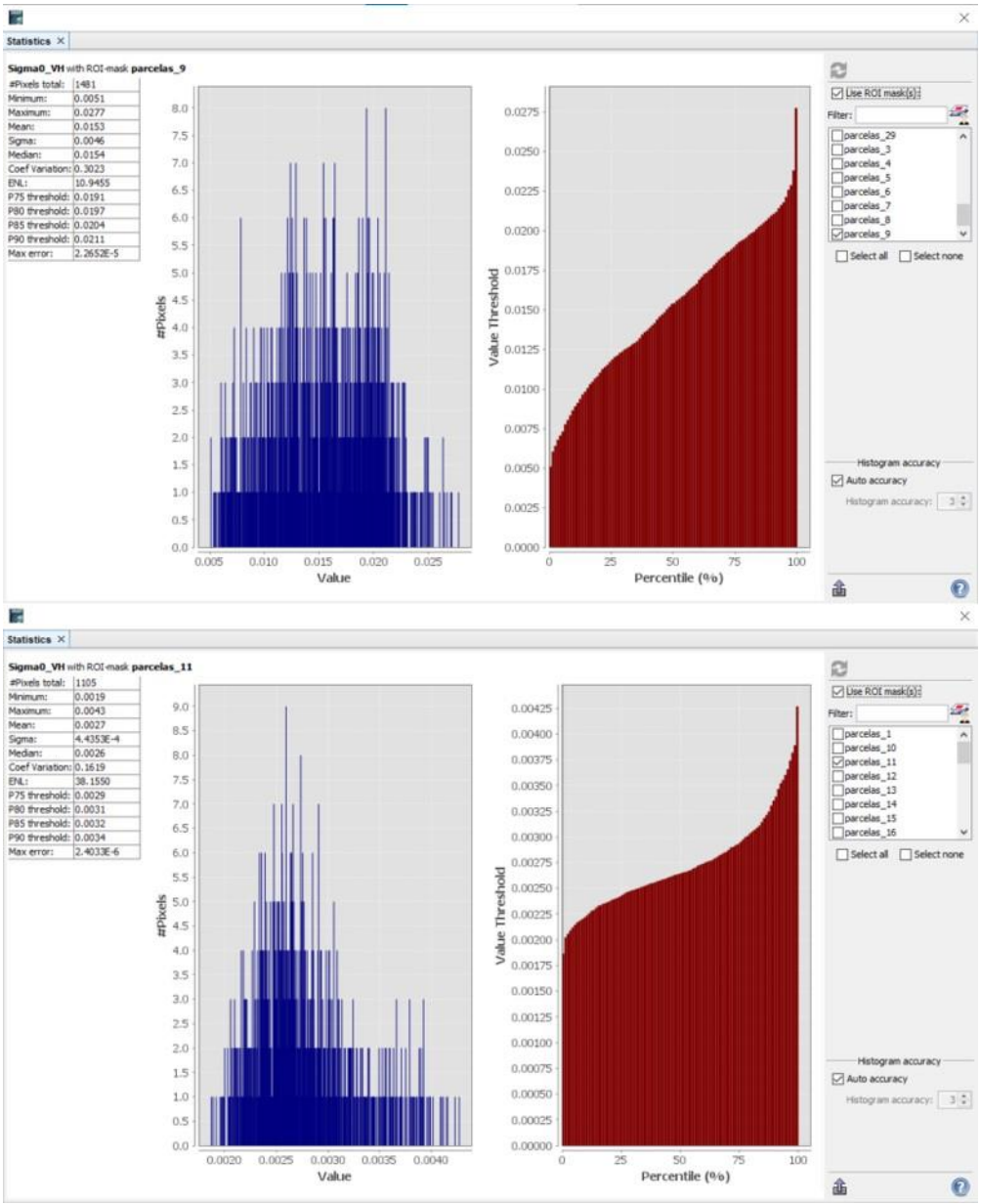

Figura 18. Ejemplos de los parámetros estadísticos obtenidos de las parcelas 9 y 11 con SNAP.

Como muestra la Figura 18, la estadística de cada parcela muestra el número total de píxeles en la parcela, el valor máximo, mínimo, la media y la mediana de los valores del coeficiente de retrodispersión, así como la desviación típica y el coeficiente de variación estadístico. También se muestran los cuartiles, con los que es posible hacer un gráfico de caja y bigote o *boxplot*.

Se procede a un análisis visual de todas las estadísticas de las parcelas junto con su localización espacial. En total se generaron 29 análisis estadísticos.

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En el análisis visual, como se observa en los ejemplos de las parcelas 9 y 11 de la Figura 18, las distribuciones muestran claramente los píxeles y sus valores. No todas las distribuciones son distribuciones normales (algunas son bimodales, alguna es plana) y se puede constatar que, aunque las parcelas se han elegido con sumo cuidado buscando la homogeneidad de los polígonos y distintas respuestas de las imágenes SAR, finalmente hay que descartar algunas por baja magnitud de la respuesta.

Una buena manera de verlo reflejado es construir los diagramas de caja y bigote (*boxplot*) como se ve en la Figura 19.

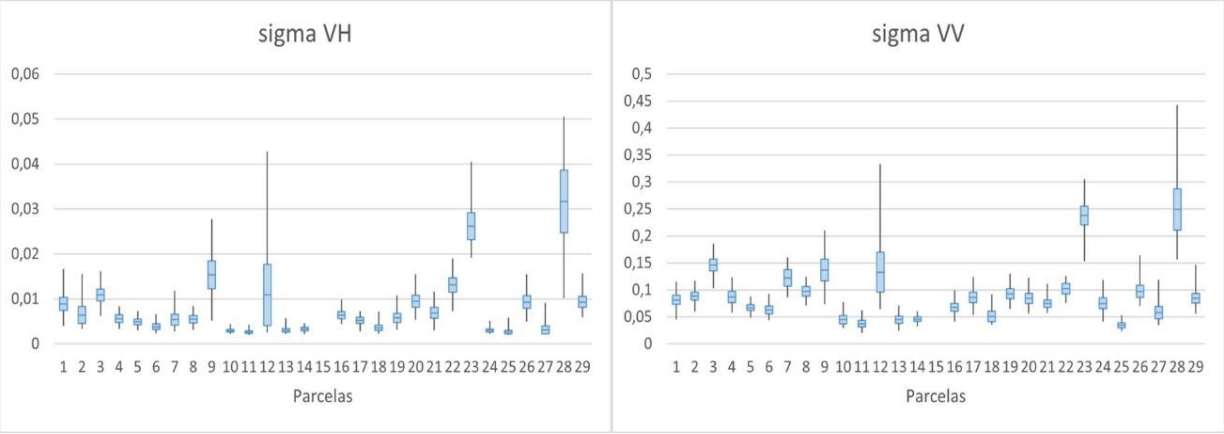

Figura 19. Diagramas de caja y bigote de las estadísticas del coeficiente de retrodispersión para las polarizaciones horizontal y vertical en todas las parcelas.

Los diagramas de caja y bigote muestran la variación de la distribución de los valores con respecto a la mediana. Se observa que casi todas las parcelas tienen un valor bastante pequeño de la retrodispersión radar SAR. Las parcelas con los valores más significativos (y con mayor dispersión) son las que responden a los números: 3, 7, 9, 12, 22, 23 y 28.

Es interesante señalar que la integración de los métodos pasivo (Sentinel-2) y activo radar SAR (Sentinel-1) es la manera óptima de caracterizar suelos por su salinidad ya que, como apuntan Nurmemet et al (2015), la reflectancia hiper o multiespectral pasiva, además de la vegetación, puede dar una medida de la salinidad del suelo, y la señal radar SAR es sensible a la constante dieléctrica del suelo, que depende a su vez de la humedad y la salinidad. Su complementariedad es una ventaja.

Destacamos entonces las parcelas con un valor de retrodispersión mayor de 0,01 en los mapas de elevación y de salinidad respectivamente en las Figuras 20 y 21:

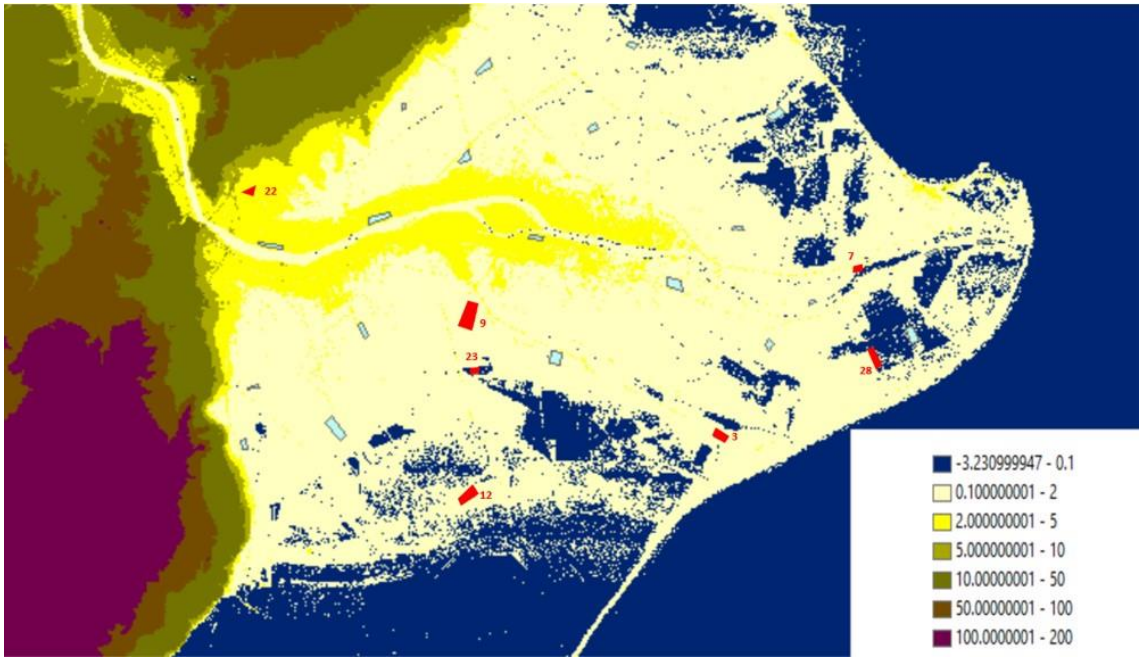

Figura 20. Mapa de elevación sobre el nivel del mar con las parcelas. Las parcelas con valor de retrodispersión radar SAR mayor de 0,01 se muestran en color rojo.

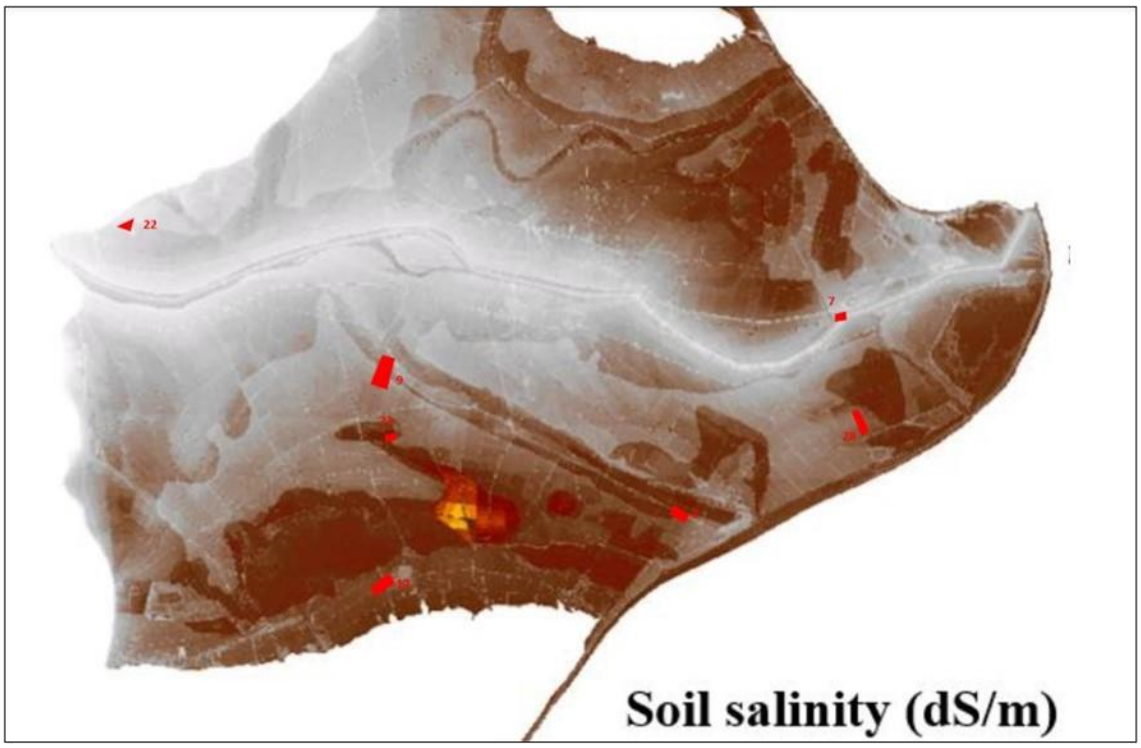

Figura 21. Mapa de la salinidad con las parcelas con valor de retrodispersión radar SAR más destacada (fuente: Ph. D. Thesis 2017, Ana Genua Olmedo).

Una de las limitaciones de este trabajo radica en la Figura 21. Esta Figura muestra el único dato de campo que se ha podido conseguir como valor real de la salinidad. La imagen no es realmente un mapa, sino una figura sin escala extraída de la tesis doctoral de Genua (2017), correspondiendo los datos de salinidad a una campaña de 2014. Afortunadamente, la forma del delta del Ebro es bastante caprichosa y fue sencillo referenciar las parcelas a la imagen.

Como se puede observar en la Figura 20, a priori es difícil establecer una relación clara con la elevación sobre el nivel del mar. Las parcelas con valor más alto de retrodispersión, como son la parcela 23 y la parcela 28, sí parecería que se encuentran muy cercanas al agua, pero precisamente por esa razón quizás lo que se está midiendo es la salinidad del agua del mar. Las parcelas 9 y 12 están más alejadas del agua marina, con lo que sí se podría estar plasmando la salinidad del terreno de las parcelas. La parcela 22, con un valor de retrodispersión también algo destacado se encuentra bastante alejada de las demás.

Para averiguar si existe relación entre la salinidad y la retrodispersión, pese a las limitaciones expuestas de la poca precisión de la figura que proporciona los datos de salinidad y de que esos datos pertenecen a un año distinto a las imágenes de teledetección utilizadas, se decidió

confrontarlos en un gráfico de dispersión. El resultado de las dos polarizaciones se encuentra en la Figura 22:

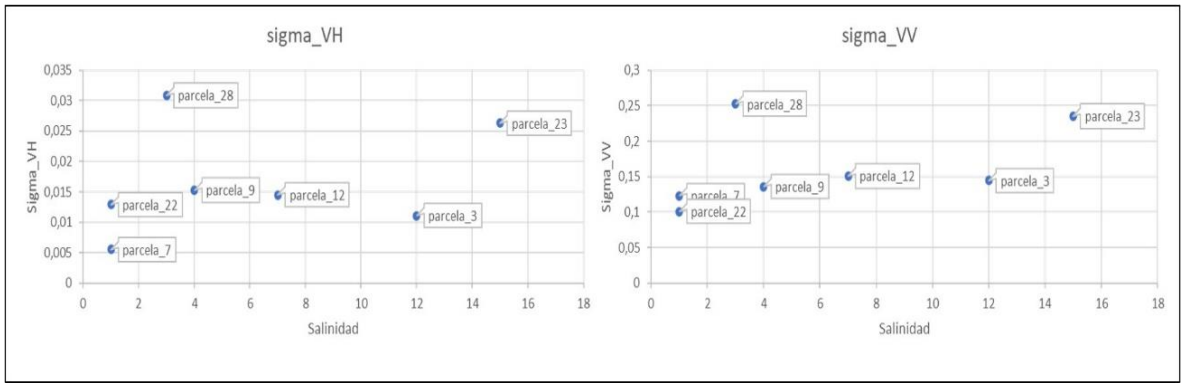

Figura 22. Relación de la retrodispersión VH y VV con la salinidad.

Se observa que existe una cierta relación en las gráficas y que, tanto en la polarización horizontal VH como en la polarización VV, exceptuando el valor atípico de la parcela 28. Esta parcela anómala podría deberse a alguna variable diferente en su caso que resulta homogénea en los otros casos, como por ejemplo la humedad del suelo, pues la retrodispersión es muy sensible a la humedad, como ya se ha comentado.

Así, eliminando del gráfico el *outlier* o valor atípico de la parcela 28, es posible establecer una tendencia cuya correlación es bastante elevada (Figuras 23 y 24):

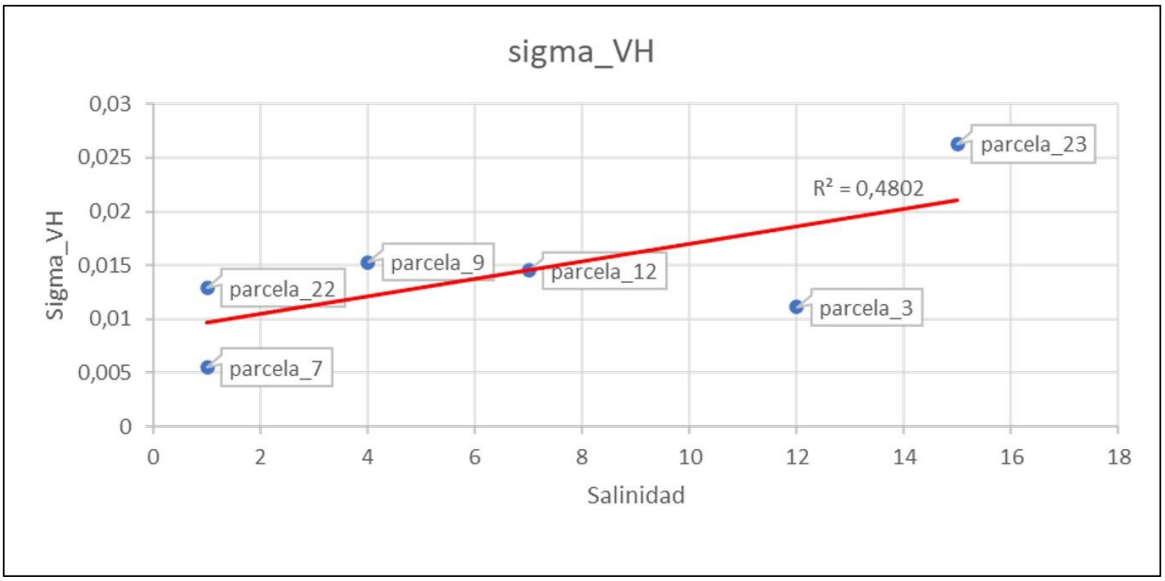

Figura 23. Relación de la retrodispersión VH con la salinidad (sin la parcela 28).

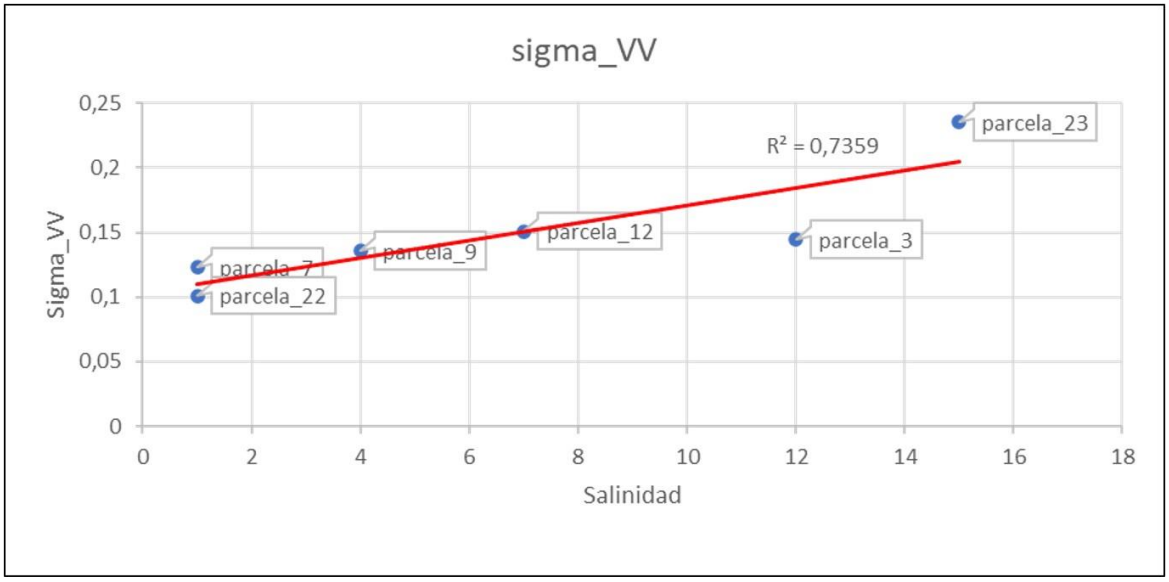

Figura 24. Relación de la retrodispersión VV con la salinidad (sin la parcela 28).

Se observa que los valores de los coeficientes de correlación de la línea de tendencia (R) son altos, constatando la correspondencia existente entre la salinidad y la retrodispersión captada por el satélite.

La aplicación de la teledetección para obtener parámetros como la humedad o la salinidad de tierras de cultivo es muy reciente, existiendo poca literatura al respecto. Tanto en los casos descritos por autores como Nurmemet et al (2015) en China, y Hoa et al (2019) en Vietnam, se dispone de datos de campo con los que comprobar la bondad de la correlación entre salinidad del suelo y el coeficiente de retrodispersión. Estos autores confirman la relación existente.

La problemática del Delta del Ebro se presta idóneamente a un estudio de estas características, dada la utilidad de conocer parámetros como la humedad o la salinidad de sus parcelas sin que el coste sea elevado. Algunos investigadores en los últimos años han llevado a cabo estudios de este tipo, pero la mayoría inciden en el peligro de la subida del nivel del mar (Alvarado-Aguilar, 2012; Genua, 2017).

El presente estudio demuestra que existe una alta correlación entre salinidad y coeficiente de retrodispersión, pero tiene dos importantes limitaciones:

a) No es posible asegurar que el resto de los parámetros que no son la salinidad permanecen invariables. Si bien esta limitación es inherente a la mayoría de los casos, es justo reseñarla en primer lugar.

b) Tras una búsqueda exhaustiva, ha resultado imposible disponer de datos numéricos reales y empíricos de la salinidad medida en campañas de campo. Únicamente se dispone de datos derivados de otro trabajo (Genua, 2017) que no coinciden temporalmente con las imágenes de satélite utilizadas aquí. La precisión espacial obtenida tampoco es óptima, pero demuestra su utilidad en este informe.

Como ya se ha especificado, la información de la salinidad y la retrodispersión están referidas a distintos años, 2014 y 2019. Sin embargo, dando crédito a los investigadores del IRTA, que aseguran que las inundaciones y la influencia de la proximidad del agua del mar no afectan a la salinidad de los terrenos del Delta, es posible suponer que la salinidad de cada parcela no sufre mayores variaciones anuales y mantiene un valor en mayor o menor medida constante. Estas razones justifican haber encontrado una relación tan clara entre la medición del satélite y la salinidad, como se esperaba al comienzo de este trabajo.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La constante dieléctrica de una superficie es un parámetro susceptible de ser medido con imágenes radar SAR puesto que influye en la intensidad de la señal de retrodispersión que capta el satélite.

En ausencia de variación de otros parámetros que afectan a la constante dieléctrica, como son la “rugosidad” o aspereza, la vegetación, la temperatura y sobre todo la humedad, se puede inferir que la retrodispersión depende exclusivamente de la conductividad del suelo, siendo ésta directamente proporcional a la salinidad.

El Delta del Ebro parecería, a priori, un área *ad hoc* para hacer este estudio, al ser una superficie llana, donde todas las parcelas de cultivo son tratadas por igual. Se cumpliría entonces la premisa de que casi todos los parámetros de las distintas parcelas son iguales en esta zona, pudiendo suponer la salinidad como única variable.

Sin embargo, establecer la relación del coeficiente de retrodispersión con la salinidad en el Delta del Ebro es una tarea complicada por la falta de datos públicos reales de salinidad medidos en campañas de campo, a pesar del empeño empleado en la búsqueda de datos.

En el presente estudio, se ha correlacionado la retrodispersión captada en las imágenes radar SAR del satélite Sentinel-1 con los datos reales disponibles de salinidad, a pesar de la poca precisión espacial y temporal del dato disponible. Aun así, se ha encontrado una relación más que satisfactoria muy parecida para las dos polarizaciones vertical-vertical y vertical-horizontal. El resultado sigue la senda marcada por Tagadoshi et alter en 2018 y es probablemente pionero en la península ibérica.

Queda explicada en esta memoria la metodología con los pasos a seguir, animando a repetir el proceso si se dispone de datos de campañas de campo más abundantes y precisos.

5. BIBLIOGRAFÍA

Alvarado-Aguilar, D., Jiménez, J.A., Nicholls, R. J. (2012) Flood hazard and damage assessment in the Ebro Delta (NW Mediterranean) to relative sea level rise. Natural Hazards (2012), 62:1301–1321.

Copernicus (2021). Europe´s eyes on Earth. Accesible en: copernicus/eu

Franquet Bernis, J.M, Albacar Damián, M. A., Tallada de Esteve, Felipe. (2017). Problemática del río Ebro en su tramo final. Accesible en: http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:UNEDCentroAsociadoTortosa-Libros-5040/Franquet_Bernis_Problematica.pdf

Genua Olmedo, Ana (2017). Modelling sea level rise impacts and the management options for rice productions: the Ebro delta as an example. *Tesis doctoral*. Universitat Rovira I Virgili.

IPCC (2007) Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge

Hoa, P.V., Giang, N.V., Binh, N.A., Hong Hai, L.V., Pham, T.D., Mahdi Hasanlou, M, and Bui, D.T. (2019) Soil Salinity Mapping Using SAR Sentinel-1 Data and Advanced Machine Learning Algorithms: A Case Study at Ben Tre Province of the Mekong River Delta (Vietnam). *Remote Sens.* **2019**, *11*(2), 128.

Horikoshi, S., Schiffmann, R.F., Fukushima, J., Serpone, N. (2018) Microwave Chemical and Materials Processing. Springer. Berlin, Germany, 2018.

Lasne, Y., Paillou, P., Freeman, A., Farr, T., McDonald, K.C., Ruffie, G., Malezieux, J.-M., Chapman, B., Demontoux, F. (2008). Effect of salinity on the dielectric properties of geological materials: Implication for soil moisture detection by means of radar remote sensing. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2008, 46, 1674–1688.

NASA Applied Remote Sensing Training (ARSET) Program. Accesible en: https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-fundamentals-remote-sensing

Nicholls RJ, Brown S, Hanson S, Hinkel J (2010) Economics of coastal zone adaptation to climate change. Discussion paper No. 10. The World Bank, Washington DC, USA

Nurmemet, I., Ghulam, A., Tiyip, T., Elkadiri, R., Ding, J., Maimaitiyiming, M., Abliz, A., Sawut, M., Zhang, F., Abliz, A., Sun, Q. (2015). Monitoring Soil Salinization in Keriya River Basin, Northwestern China Using Passive Reflective and Active Microwave Remote Sensing Data. *Remote Sens.* **2015**, *7*, 8803-8829.

Taghadosi, M. M., Hasanlou, M. & Eftekhari, K. (2018). Soil salinity mapping using dual-polarized SAR Sentinel-1 imagery. *International Journal of Remote Sensing*, Volume 40, 2019, Issue 1.

THE EUROPEAN SPACE AGENCY, © ESA 2000-2021. Accesible en: sentinel.esa.int

Zozaya, A. J. (2016). Radares de apertura sintética: procedimiento de diseño. Revista INGENIERÍA UC, vol. 23, núm. 2, agosto, 2016, pp. 97-115. Universidad de Carabobo. Carabobo, Venezuela