

**Universidad Pública de Navarra**

***Nafarroako Unibertsitate Publikoa***

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN  
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA***

# **MONITORIZACIÓN DE CEREALES DE SECANO MEDIANTE OBSERVACIONES RADAR.**

presentado por

Amaia Fernández Bandrés

*aurkeztua*

**GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y DEL MEDIO RURAL  
*GRADUA NEKAZARITZAKO ELIKAGAIEN ETA LANDA INGURUNEAREN  
INGENIARITZAN***

Junio, 2015

2015 eko, Ekaina

## **AGRADECIMIENTOS**

A Jesús Álvarez Mozos, director de este Trabajo Final de Grado, por su constante apoyo y amabilidad.

A mis compañer@s, por escucharme día tras día y darme su apoyo.

A mis padres y a mi hermano, sin los cuales no habría llegado hasta aquí.

A tod@s ell@s, muchas gracias!!

## **Abstract**

Cereals are very important crops worldwide. Their management and cropping techniques could improve if recent innovations in the field of remote sensing (and others) were applied. In the last decades, several space agencies have made a bet on the use of SAR (Synthetic Aperture Radar) technology (in combination or substitution of optical imagery) for earth observation. Therefore, it is necessary to evaluate the utility of this imagery for a range of applications. In particular, this project is focused on evaluating the utility of X-band SAR imagery for the monitoring of wheat and barley crops. To do this, several crop variables (phenology, biomass or canopy height) have been measured in situ, and next have been confronted with backscattering coefficient ( $\sigma^0$ ) values observed in different polarizations (VV and VH). TerraSAR-X images (obtained with a 42° incidence angle) were geometrically and radiometrically corrected using specific image processing software. The results obtained, illustrate a distinct behavior of cereals depending on their phenological stage. On the first phases, a clear  $\sigma^0$  attenuation is observed in VV polarization, whereas VH shows a rather insensitive behavior. From the booting stage onwards, and especially after heading, a more dispersed behavior is observed in both polarizations. This is due to the low penetration capacity of microwaves at this band and incidence angles, thus providing information only on the most shallow plant constituents.

**Key words: SAR, X-band, polarization, cereals, biomass**

## Índice

1.	Introducción .....	9
2.	Antecedentes .....	13
2.1.	Los cereales. Morfología y fisiología .....	13
2.1.1.	Morfología.....	13
2.1.2.	Fisiología.....	14
2.2.	Navarra. Variedades y manejo del cultivo .....	18
2.2.1.	Variedades.....	18
2.2.2.	Manejo del cultivo.....	20
2.3.	Teledetección en agronomía.....	23
2.3.1.	Historia .....	23
2.3.2.	Imágenes ópticas.....	26
2.3.3.	Imágenes radar.....	30
3.	Objetivos .....	35
4.	Metodología empleada .....	36
4.1.	Medios materiales.....	36
4.1.1.	Ubicación de la zona de estudio.....	36
4.1.2.	Manejo del cultivo.....	37
4.1.3.	Datos de campo e imágenes radar.....	39
4.1.4.	Software .....	40
4.2.	Método de análisis .....	41

4.2.1.	Obtención de los datos de campo.....	41
4.2.2.	Obtención de los datos radar .....	41
4.3.	Diseño experimental .....	44
5.	Resultados y discusión .....	46
5.1.	Datos de campo.....	46
5.2.	Correlaciones $\sigma^0$ -datos campo .....	49
5.3.	Sensibilidad de la cubierta vegetal.....	50
5.4.	Sensibilidad del suelo .....	60
5.5.	Discusión conjunta .....	60
6.	Conclusiones.....	63
7.	Bibliografía .....	64
8.	ANEXOS .....	70
	ANEXO 1: INFORMACIÓN PARCELAS.....	70
	ANEXO 2: DATOS DE CAMPO .....	79
	ANEXO 3: TUTORIAL SENTINEL-1 TOOLBOX.....	85

## Índice de Figuras

Figura 1. Producción de cereal a nivel mundial (FAO, 2015) .....	9
Figura 2. Predicción de la producción, consumo y superficie de trigo a nivel mundial (International Grains Council, 2014).....	10
Figura 3. Predicción de la producción, consumo y superficie de cebada a nivel mundial (International Grains Council, 2014).....	11
Figura 4. Evolución de la producción de trigo y cebada en Navarra (Gobierno de Navarra, 2015) .....	12
Figura 5. Evolución de la superficie cultivada de trigo y cebada en Navarra (Gobierno de Navarra, 2015) .....	12
Figura 6. Fases de desarrollo siguiendo la escala decimal Zadoks (Meier, 2001) .....	16
Figura 7. Componentes del rendimiento y fases del desarrollo (Rawson & Macpherson, 2001) .....	17
Figura 8. Recomendaciones de INTIA para las siembras de cereal en Zona de Baja Montaña (Segura et al., 2013).....	21
Figura 9. Cronograma sobre la Historia de la Teledetección en España (Casal & Freire, 2012) .....	23
Figura 10. Espectro electromagnético (Scan Terra, 2015).....	27
Figura 11. Firma espectral de la cubierta vegetal sana, enferma y el suelo (Scan Terra, 2015) .....	28
Figura 12. Ejemplos de isóneas de NDVI y SAVI para distintos valores de LAI (Gilabert et al., 1997) .	29
Figura 13. Ecuación Fundamental del Radar (Marchionni, Daniela S., Cavayas, François, 2014) .....	31
Figura 14. Polarización (Marchionni & Cavayas, 2014) .....	32
Figura 15. Geometría de la observación de un sistema radar (Modificado de Raney, 1992) .....	32
Figura 16. Respuesta radar de superficies de distinta rugosidad siguiendo el criterio de Rayleigh (Marchionni & Cavayas, 2014) .....	33
Figura 17. Localización de las parcelas en sus respectivos municipios (IDENA, 2015). .....	36
Figura 18. Proceso seguido en el tratamiento de las imágenes radar .....	42
Figura 19. Efectos geométricos de las imágenes SAR (ESA, 1995).....	43
Figura 20. Ecuación Coeficiente de retrodispersión, $\sigma^0$ (AIRBUS defence and space, 2014) .....	43
Figura 21. Conversión a dB (AIRBUS defence and space, 2014) .....	44
Figura 22. Calendario de toma de datos.....	45
Figura 23. Evolución del estado fisiológico según Zadoks a lo largo del ciclo del cultivo .....	46
Figura 24. Evolución de la biomasa seca a lo largo del ciclo del cultivo .....	47
Figura 25. Evolución de la biomasa húmeda a lo largo del ciclo del cultivo .....	48
Figura 26. Evolución de la altura de las cubiertas a lo largo del ciclo del cultivo .....	48
Figura 27. Comparación y tendencia (línea roja) del Coeficiente de retrodispersión con la Escala fenológica (Zadoks) para las distintas polarizaciones de las parcelas de trigo y cebada .....	51
Figura 28. Comparación y tendencia (línea roja) del Coeficiente de retrodispersión con la Biomasa seca para las distintas polarizaciones de las parcelas de trigo y cebada .....	53
Figura 29. Comparación y tendencia (línea roja) del Coeficiente de retrodispersión con la Biomasa fresca para las distintas polarizaciones de las parcelas de trigo y cebada .....	55
Figura 30. Comparación y tendencia (línea roja) del Coeficiente de retrodispersión con la Altura de la cubierta para las distintas polarizaciones de las parcelas de trigo y cebada .....	58
Figura 31. Parcela 1.....	70
Figura 32. Parcela 2.....	71
Figura 33. Parcela 3.....	72
Figura 34. Parcela 4.....	73
Figura 35. Parcela 5.....	74
Figura 36. Parcela 6.....	75

**Figura 37. Parcela 7 ..... 76**  
**Figura 38. Parcela 8 ..... 77**  
**Figura 39. Parcela 9 ..... 78**

## Índice de Tablas

Tabla 1. Recomendaciones de las variedades de trigo y cebada por zonas en Navarra (Goñi et al., 2008) .....	19
Tabla 2. Recomendaciones variedades de trigo y cebada para regadío (Goñi et al., 2008) .....	20
Tabla 3. Recomendación densidad de siembra (itg Agrícola, 2008) .....	22
Tabla 4. Recomendaciones generales para la aportación de fósforo en cereales (itg Agrícola, 2008)...	22
Tabla 5. Índices de Vegetación más usados en teledetección (Prabhakara, Hively, & McCarty, 2015) ..	29
Tabla 6. Información Catastral y de cultivo de las parcelas .....	36
Tabla 7. Manejo del cultivo en las parcelas .....	38
Tabla 8. Características de las imágenes TerraSAR-X (AIRBUS defence and space, 2014) .....	39
Tabla 9. Características imágenes radar utilizadas en el proyecto .....	40
Tabla 10. Resultados $R^2$ para el trigo.....	49
Tabla 11. Resultados $R^2$ para la cebada .....	49
Tabla 12. Patrón Estados fenológicos.....	52
Tabla 13. Patrón biomasa fresca .....	56
Tabla 14. Patrón biomasa seca.....	56
Tabla 15. Patrón Humedad cubierta .....	56
Tabla 16. Patrón Altura cubierta .....	59
Tabla 17. Patrón Índice de biomasa .....	59
Tabla 18. Patrón humedad del suelo.....	60



## 1. Introducción

Los cereales forman desde la antigüedad la base en la dieta del ser humano debido a su alto aporte calórico. Con el aumento previsto de la población para los próximos años los cereales van a seguir siendo un pilar importante en la alimentación. Desde las últimas décadas la producción de cereales va destinada tanto al consumo del ser humano como, cada vez más, la fabricación de piensos para cubrir la nueva tendencia de un mayor consumo de carne. Tanto la producción como el comercio de cereales están al alza como se explica a continuación más detalladamente.

La utilización mundial de cereales en 2014/2015 se estima que crezca en un 2,6 % con respecto a la campaña anterior. Se prevé que el consumo humano mundial de cereales crezca un 1,4 % llegando a los 1.108 millones de toneladas. Por otro lado, la importancia que tiene el mercado de cereal para piensos es cada vez mayor, en gran medida el aumento de la producción de cereal se debe a la oportunidad que ofrece esta nueva vía de mercado. La utilización de cereales para piensos puede llegar a aumentar hasta un 4 % este año alcanzando los 877 millones de toneladas, en gran parte debido al incremento del uso del maíz: un 3,7 % (FAO, 2015).

Después de haber alcanzado en la cosecha de cereal en el año 2013 unos máximos históricos a nivel mundial (Figura 1) se alcanzaron los 2544 millones de toneladas, las estimaciones para el año 2014 apuntan a un ligero ascenso debido a una cosecha de maíz mayor de lo previsto en la Unión Europea (UE). En general las perspectivas estiman un aumento de la producción en los próximos años (FAO, 2015).

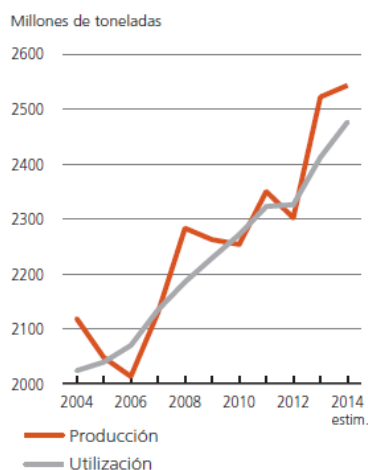
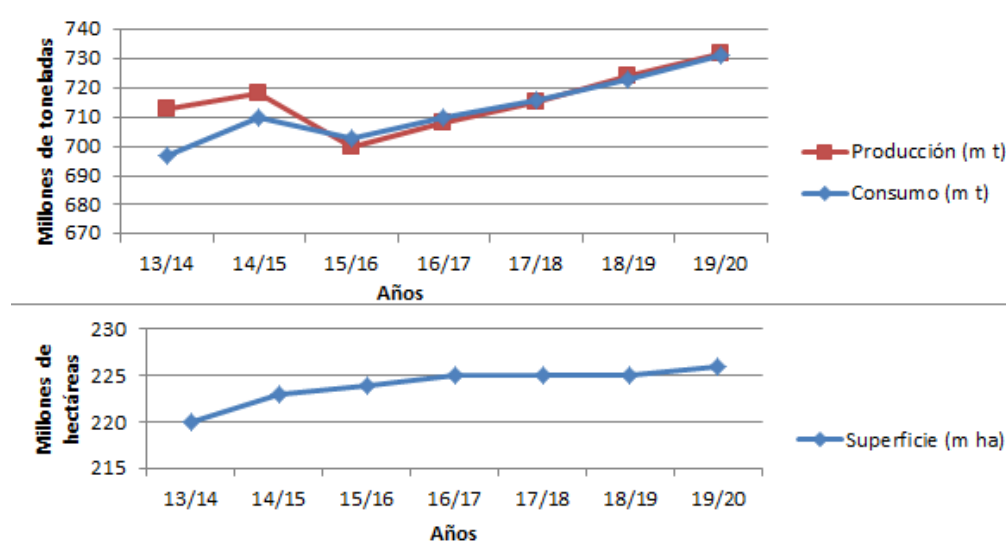


Figura 1. Producción de cereal a nivel mundial (FAO, 2015)

Más concretamente, el trigo en cabeza y la cebada en segunda posición son los dos cereales con mayor producción y consumo en el mundo, si se excluye el arroz. Como se puede ver en la Figura 2, tras haber alcanzado un máximo histórico en la producción de trigo en el año 2013/2014 se prevé un aumento en la presente campaña. Si se consulta la FAO la previsión es todavía más favorable llegando a los 722 millones de toneladas. También se puede ver que la superficie destinada a trigo no va a dejar de aumentar gradualmente en los próximos años. La caída en la producción en el año 2015 se debe a factores climáticos que retrasa la siembra del cultivo (Maluenda García, 2014).

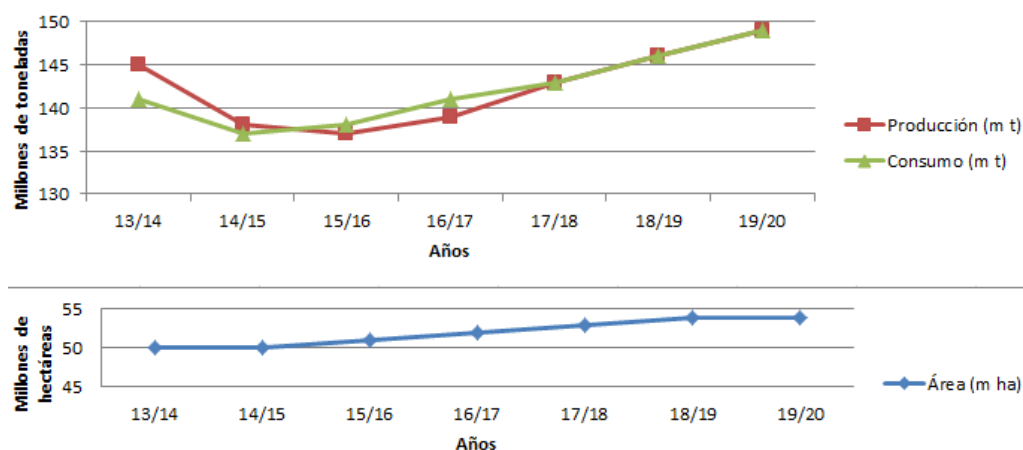


**Figura 2. Predicción de la producción, consumo y superficie de trigo a nivel mundial (International Grains Council, 2014)**

La producción no se produce homogéneamente en toda la superficie de la Tierra, esto se debe tanto a factores medioambientales como a humanos y políticos. En los países de bajos ingresos y con déficit de alimentos (PBIDA) del hemisferio norte las perspectivas en general son positivas pero en el hemisferio sur debido a las condiciones meteorológicas desiguales son más pesimistas. La India se impone como el mayor productor entre los PBIDA y espera mantener el alto nivel alcanzado los últimos años, alrededor de los 240 millones de toneladas. En Asia, en general, se espera para este año un aumento de la producción de trigo, sobretodo en Pakistán que se prevé llegar al record alcanzado el año pasado. China es con diferencia el mayor productor de cereal en Asia con una producción estimada para 2014 de 559,1 millones de toneladas. En África las perspectivas son bastante inciertas en algunas zonas como en La República Centroafricana (RCA) donde el conflicto generalizado afecta negativamente a las actividades agrícolas. A pesar de ello, en la mayoría de países Africanos se estiman cosechas satisfactorias en 2014. La producción total de los cultivos alimentarios aumentó un 11 % respecto a la producción fuertemente reducida de 2013, pero se mantuvo a una distancia del 58 % de los años anteriores a la crisis (2008/2012). En América central, el Caribe y América del

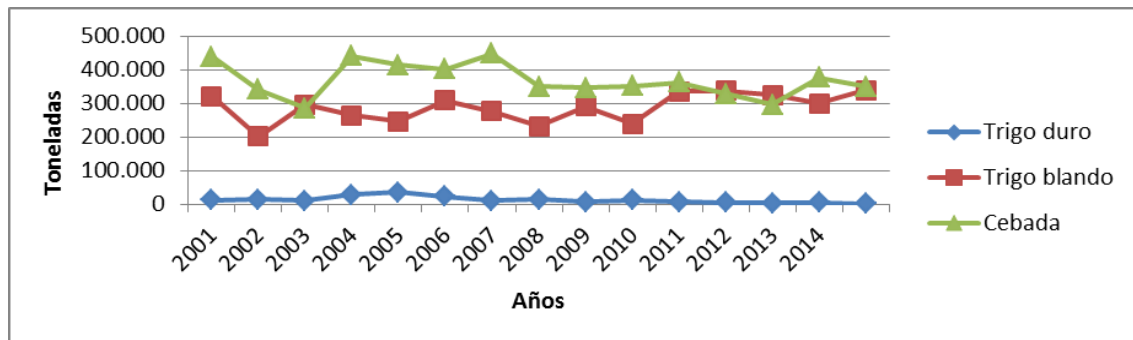
Sur la producción de cereal se reduce al maíz, al arroz y a algún cereal secundario. Los principales productores de trigo son Argentina y Brasil donde ha habido un aumento en las siembras debido a los altos precios de la temporada. En América del Norte las perspectivas para el 2015 son inciertas debido a las condiciones meteorológicas, a pesar de ello se calcula un total de 494,9 millones de toneladas de cereales, es importante recalcar que 399,4 millones de toneladas son cereales secundarios (maíz, sorgo, cebada, etc). Europa es el segundo productor a nivel mundial, por detrás de China, con una producción estimada para el 2014 de 516,5 millones de toneladas. Las perspectivas para las cosechas de cereales de invierno son desiguales pero para el 2015 se pronostica una disminución del 5 % respecto al 2014 (FAO, 2015).

En la Figura 3 se puede ver la caída que se estima en la producción y consumo de la cebada entre los años 2014-2016 aunque la superficie cultivada se mantiene constante e incluso experimenta un aumento en los próximos años. La producción de cebada descendería un 8% a causa de los rendimientos más bajos de los países productores de la UE, Canadá y Australia principalmente. Mientras que el consumo podría caer un 3%, por el descenso de la producción y por la competencia de otros cereales como el trigo y el maíz a precios más bajos. Las causas de este descenso en la UE, se han debido al tiempo seco y caluroso a principios de Junio, seguido de precipitaciones, que aunque favorecieron los niveles de humedad del suelo, retrasaron las labores de cultivo, incluso impidieron en algunas zonas sembrar cebada (Maluenda García, 2014). A partir del 2017 se prevé una remontada tanto en consumo como en producción.



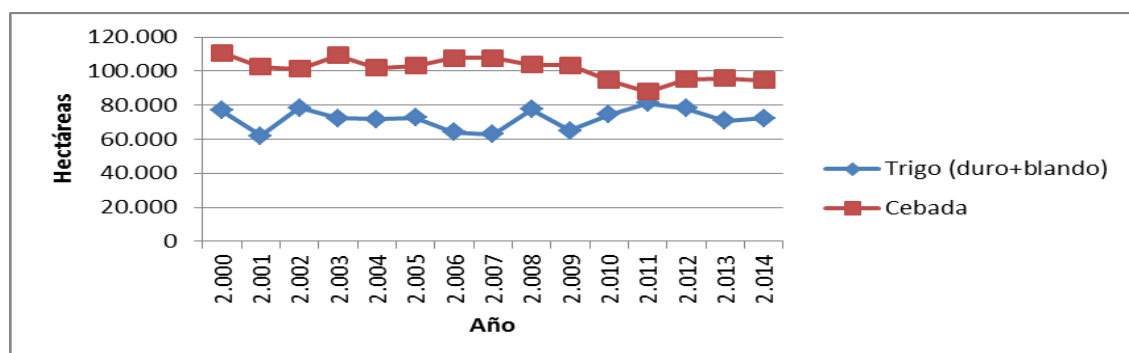
**Figura 3. Predicción de la producción, consumo y superficie de cebada a nivel mundial (International Grains Council, 2014)**

La producción de cebada y trigo en Navarra también es muy importante. Como se puede ver en la figura 4, la producción de cebada ha sido tradicionalmente mayor que la de trigo pero desde 2011 ambas producciones se han igualado. Ambos cereales ocupan una superficie importante de dicha Comunidad, se puede ver en la Figura 5 que la superficie se ha mantenido más o menos constante a lo largo de los últimos años.



**Figura 4. Evolución de la producción de trigo y cebada en Navarra (Gobierno de Navarra, 2015)**

La cebada en el año 2014 llegó a ocupar el 33,20 % de la superficie total cultivada en Navarra. El trigo, un poco por detrás, alcanzó el 25,37 % del total. Con estos datos se percibe la importancia de estos dos cultivos en esta Comunidad (Gobierno de Navarra, 2015).



**Figura 5. Evolución de la superficie cultivada de trigo y cebada en Navarra (Gobierno de Navarra, 2015)**

## 2. Antecedentes

### 2.1. Los cereales. Morfología y fisiología

#### 2.1.1. Morfología

Los cereales tienen un **sistema radicular** formado por raíces primarias o seminales, que arrancan del germen de la semilla, y raíces secundarias, adventicias o coronales, que nacen del nudo del ahijamiento para sustituir poco a poco a las raíces seminales (Bellido, 1990). En el caso del trigo y la cebada, ambos, tienen entre 5 y 6 raíces primarias que son funcionales normalmente desde la emergencia hasta el comienzo del ahijado. Las raíces secundarias son de tipo fasciculado y se extienden oblicuamente en todas las direcciones, variando su importancia y profundidad.

El trigo y la cebada tienen unas raíces más superficiales que el resto de cereales, aunque llegan a alcanzar los 2-3 metros de profundidad. Las raíces más superficiales tienen como objetivo absorber los principios nutritivos fijados por el suelo, como iones fosfóricos, potásicos, amónicos y otros, mientras que las más profundas absorben agua y principios no retenidos por la arcilla, nitratos o cloruro (García Fernández, 1971).

El **sistema aéreo** de los cereales está formado por tallos que crecen desde el nudo de ahijamiento localizado en la base de la planta. Cada tallo porta las hojas, acabando, en la inflorescencia.

Los **tallos** están formados por nudos y entrenudos, los primeros están llenos y lignificados y son zonas meristemáticas a partir de las cuales se alargan los entrenudos y se diferencian las hojas. Cada nudo es un punto de unión de una hoja. El número de entrenudos, en los tallos portadores de espigas, varía de 5 a 9 según especies y variedades (Bellido, 1990). En las proximidades del suelo los entrenudos son cortos, llevando yemas que dan lugar a nuevas raíces y a nuevos tallos, fenómeno conocido como ahijamiento (García Fernández, 1971).

Las **hojas** se disponen alternas y en dos filas a lo largo del tallo. Cada hoja se divide en dos partes: la vaina, que es la zona inferior que envuelve el entrenudo y el limbo o zona superior. Según la especie y variedad las vainas pueden ser glabras o ciliadas, sujetas a nivel de los nudos y formando un tubo cilíndrico en torno al tallo. En la unión del limbo y la vaina puede existir una pequeña membrana o lámina membranosa, no vascular, más o menos alargada y dentada, llamada lígula. A cada lado de ésta, en la base del limbo, se encuentran las estípulas, más o menos abrazadoras, glabras o vellosas. El trigo tiene lígula y dos estípulas pequeñas y vellosas, en cambio la cebada tiene lígula y dos estípulas glabras muy abrazadoras (Bellido, 1990).

En los cereales existen dos tipos de **inflorescencia**: en forma de espiga (trigo, cebada y centeno) y en forma de panícula (avena, arroz y sorgo). La unidad morfológica básica es la espiguilla cuyo conjunto integra la inflorescencia. La espiguilla tiene de una a varias flores

envueltas por dos glumillas, inferior y superior, denominadas lema y pálea. La espiguilla está envuelta en dos brácteas o glumas, uniéndose al eje principal de la inflorescencia o raquis, en el caso de la inflorescencia en espiga, o a una de las ramificaciones laterales si la inflorescencia es en panícula. El número de flores fértiles varía según la especie, siendo de 2 a 5 en el trigo harinero, de 2 a 4 en el trigo duro y 1 en la cebada. El trigo, cebada y avena muestran una autogamia preponderante, con una tendencia marcada a la cleistogamia (Bellido, 1990).

El **fruto** de las gramíneas es seco e indehisciente, denominado cariópside, estando el grano, propiamente dicho, encerrado en el tegumento del fruto, denominado pericarpio, que proviene de los tejidos del ovario. Los granos se pueden clasificar en dos grandes grupos: grano o cariópside vestido como en el caso de la cebada y grano desnudo como en el caso del trigo (Bellido, 1990).

### 2.1.2. Fisiología

Los cereales se caracterizan por su aptitud al ahijado, que consiste en la formación en la base del tallo, a nivel del suelo, de un nudo de ahijamiento en el que están embutidos numerosos nudos, a cada uno de los cuales corresponde la inserción de una hoja, en cuya axila lleva un esbozo de yema susceptible de formar un tallo y una masa celular capaz de generar una raíz secundaria o adventicia.

Todos los tallos vegetativos del cereal no llevarán, al final de su ciclo, una espiga o panícula, ya que sólo algunos proseguirán su desarrollo hasta el encañado, alargando sus entrenudos y dando lugar a un tallo que terminará en inflorescencia. El tallo principal es el que primero se encaña, y a continuación los demás, con un desfase de tiempo.

El ciclo de desarrollo de los cereales se divide en diferentes periodos, cada una de los cuales es designado por las características que la planta manifiesta durante el mismo: ahijado, encañado, espigado y maduración. En general, el ciclo se clasifica en 3 grandes periodos:

- **Período vegetativo o de formación de hojas**, que transcurre desde la germinación hasta el fin del ahijamiento.
- **Período de reproducción o de formación de tallos**, que va desde el encañado hasta la fecundación.
- **Período de formación y maduración del grano**, que transcurre desde la fecundación hasta la maduración.

Los periodos se pueden dividir en fases que se diferencian unas de otras por estados precisos y bien definidos sobre la planta, que se describen siguiendo diferentes **escalas fenológicas**. Una de las escalas fenológicas más utilizadas es la de Zadoks (Figura 6) ya que se describe lo que se puede ver a simple vista y es muy útil para realizar las labores de campo. Esta escala divide el ciclo del cereal en 10 fases. Para empezar a trabajar con esta escala hay que decidir qué fases

principales se ajustan mejor a la descripción del cultivo, para ser más precisos si se observa el cultivo con más detalle se puede dividir cada fase en 10 sub-fases dependiendo de la evolución (Rawson & Macpherson, 2001).

Código	Descripción
<b>Estadio principal 0. Geminación</b>	
00	Semilla seca
01	Comienza la imbibición de la semilla
03	Imbibición completa de la semilla
05	Radícula (raíz embrional) emergida de la semilla
06	Radícula alargada, formando pelos radiculares y raíces secundarias
07	Coleóptilo, emergido de la semilla
09	Emergencia: el coleóptilo traspasa la superficie del suelo.
<b>Estadio principal 1. Desarrollo de las hojas (tallo principal)</b>	
10	1a hoja, atraviesa el coleóptilo
11	1a hoja, desplegada
12	2 hojas, desplegadas
13	3 hojas, desplegadas
14	Los estadios continúan hasta
19	9 o más hojas, desplegadas
<b>Estadio principal 2. Formación de brotes laterales (macollaje)</b>	
20	No hijuelo visible
21	Comienzo del macollamiento; 1 hijuelo visible
22	2 hijuelos o macollas visibles
23	3 hijuelos o macollas visibles
24	Los estadios continúan hasta ...
29	Fin del macollamiento; el máximo de hijuelos o macollas
<b>Estadio principal 3. Encañado</b>	
30	Comienzo del encañado: pseudotallo e hijuelos, erectos; el primer entrenudo comienza a alargarse; el extremo de la inflorescencia, 1 cm por encima del nudo del ahijamiento.
31	1er nudo, por lo menos a 1 cm por encima del nudo del macollaje.
32	2o nudo: perceptible, a 2 cm del 1er nudo
33	3er nudo: perceptible, a 2 cm del 2o nudo
34	Los estadios continúan hasta ...
37	Aparece la última hoja (hoja bandera), aún enrollada
39	Estadio hoja bandera: hoja bandera completamente desenrollada, lígula recién

**Estadio principal 4. Hinchamiento de las panículas o espigas (Embuchamiento)**

41	Estadio hinchado temprano: se alarga la vaina de la hoja bandera
43	Estadio hinchado medio: se empieza a ver la vaina de la hoja bandera, hinchada.
45	Estadio hinchado tardío: la vaina de la hoja bandera está hinchada
47	Se empieza a abrir la vaina de la hoja bandera
49	Primeras aristas (barbas), visibles (sólo en variedades aristadas)

**Estadio principal 5. Salida de las espigas o panículas (Espigado)**

51	Comienzo del espigado: la punta de la espiga o de la panícula emegen de la vaina; 1 espiguilla recién visible.
52	20 % de la espiga emergida
53	30 % de la espiga emergida
54	40 % de la espiga emergida
55	Mitad del espigado: emergida la mitad de la espiga o panícula.
56	60 % de la espiga emergida
57	70 % de la espiga o panícula emergida
58	80 % de la espiga emergida
59	Fin del espigado: la espiga o panícula completamente fuera.

**Estadio principal 6. Floración (tallo principal)**

61	Comienzo de la floración: primeras anteras visibles
65	Plena floración: 50 % de las anteras maduras
69	Fin de la floración: todas las espiguillas han terminado la floración, pero todavía pueden permanecer algunas anteras deshidratadas.

**Estadio principal 7. Formación del fruto**

71	Estadio de madurez acuosa: los primeros granos han alcanzado la mitad de su tamaño final
73	Grano lechoso temprano
75	Grano lechoso medio: contenido del grano lechoso, granos, de tamaño final, verdes todavía.
77	Grano lechoso tardío

**Estadio principal 8. Maduración de frutos y semillas**

83	Pastoso temprano
85	Pastoso blando: contenido del grano, blando, pero seco; no se mantiene la huella de la uña del dedo
87	Pastoso duro: contenido del grano, sólido; se mantiene la huella de la uña del dedo.
89	Madurez completa: grano duro, difícil de dividir con la uña del pulgar.

**Estadio principal 9. Senescencia**

92	Sobre-madurez: granos, muy duros, no pueden ser mellados con la uña del pulgar
93	Granos, desprendiéndose durante el día
97	Planta muerta, tallos se quiebran
99	Producto cosechado

**Figura 6. Fases de desarrollo siguiendo la escala decimal Zadoks (Meier, 2001)**

La siguiente figura (7) relaciona las fases externas de la escala Zadoks (en rojo) y los dos estados internos observables en el ápice, doble arruga y espiguilla terminal. La doble arruga no puede ser identificada ya que el punto de crecimiento está en ese momento encerrado dentro de la corona de la planta. Pero la espiguilla terminal se puede ver si se abre el tallo con las uñas 1 cm por encima de la corona, aunque es muy pequeña ya se asemeja a una espiga



emergida. Los recuadros verdes muestran el momento en que se inician, crecen y mueren los componentes del tallo y las barras cuándo se forman los componentes del rendimiento. Esta información ayuda a identificar qué componentes están siendo afectados por las prácticas del agricultor en un determinado momento (Rawson & Macpherson, 2001).

En los cereales, el abonado es muy importante y por ello se debe detectar los déficits para poder actuar a tiempo. Por ejemplo actuar al final del ahijado o comienzo del encañado (Z 30) es clave por su influencia en la formación del rendimiento, pues aumenta el vigor de los tallos formados, incrementa la proporción de tallos con espigas, mejora el desarrollo de las hojas superiores, favorece o incrementa la fertilidad de la espiga y mejora el llenado del grano (Bellido, 2012).

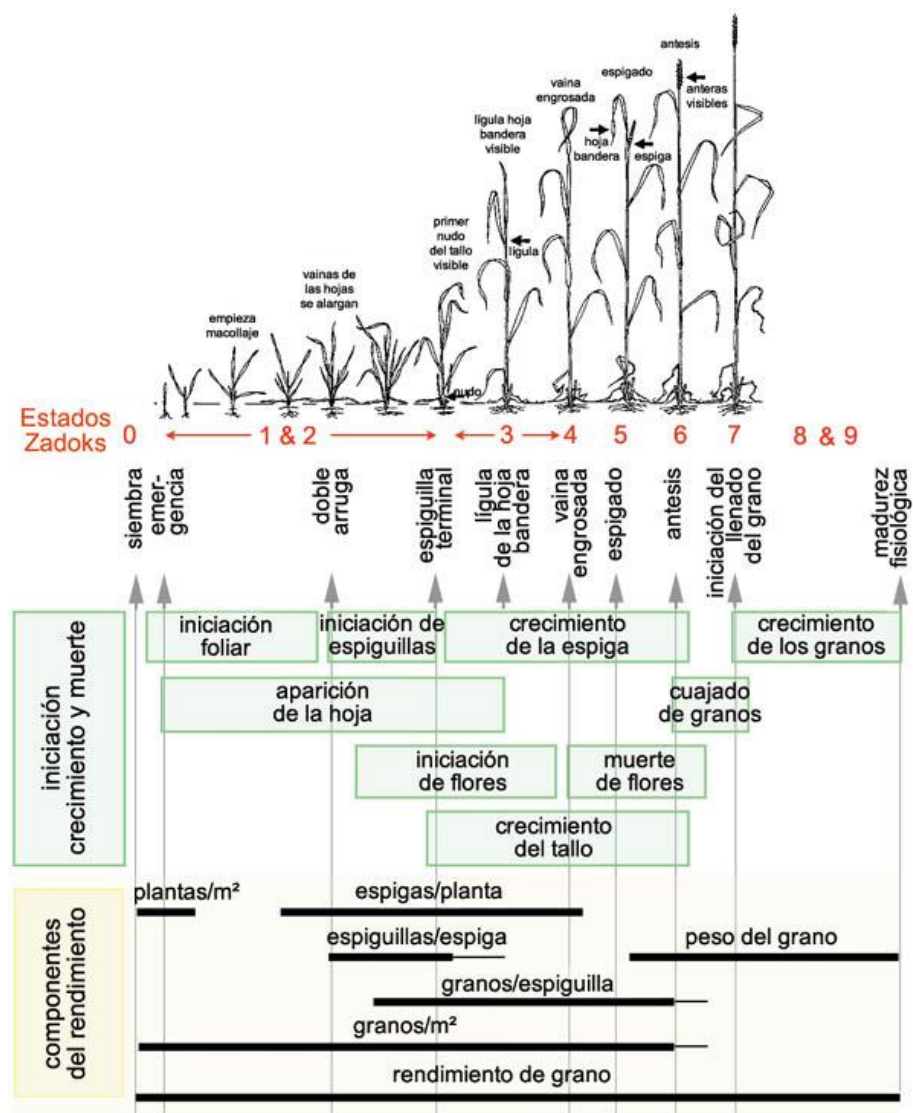


Figura 7. Componentes del rendimiento y fases del desarrollo (Rawson & Macpherson, 2001)

## 2.2. Navarra. Variedades y manejo del cultivo

### 2.2.1. Variedades

Los cereales en Navarra tradicionalmente han sido cultivados en secano pero desde la construcción del Canal de Navarra la rotación de cultivos en esas áreas puede alcanzar unas 100.000 ha en los próximos años. La necesidad de conservar la cuota de producción de cereal correspondiente a la Comunidad según el Plan de Regionalización Productiva CEE (Reglamento 1765/92/CEE), obliga a obtener esa producción en la nueva zona regable en una proporción de 4 a 1, para lo que hay que reservar unas 25.000 ha (Riegos de Navarra, 2015). Actualmente un 12% de la zona cubierta por el canal está sembrada con cebada frente a un 60% que se sembraba antes de la construcción (REGADIOX, 2015).

Para el cultivo de cereal lo primero que hay que tener en cuenta es la zona en la que se va a sembrar ya que en Navarra el clima es muy diverso. Por ejemplo, el ITG Agrícola (2008) trabaja con una zonificación que permite establecer seis áreas o zonas agroclimáticas diferentes. A nivel experimental estas seis zonas se agrupan en tres:

- Secanos frescos (Zona Baja Montaña y Zona Media), con pluviometría superior a los 600 mm anuales y parcelas de alto potencial productivo
- Secanos semiáridos (Zona Intermedia y Zona Semiárida) con la sequía como riesgo más importante.
- Regadíos.

En los secanos frescos, estudios de Goñi et al. (2008) para la **cebada**, concluyen que la variedad Opal muestra un buen potencial de rendimiento. Naturel da un rendimiento flojo, quizás influenciado por la climatología, e Hispanic es la variedad que da menor rendimiento en el ensayo. Las variedades de 6 carreras Regalis, Cierzo y Marado tienen un rendimiento extraordinario superando los 8.000 kg/ha. El peso específico de esta variedad es bajo, se destaca el grano pequeño de Cierzo. Meseta a pesar de ser una variedad de 2 carreras alcanza el nivel de productividad de las de 6.

En los secanos semiáridos los rendimientos obtenidos rondan los 2500 kg/ha existiendo muy poca diferencia entre variedades. Destaca la variedad Meseta por su buen peso específico.

De todas las variedades citadas anteriormente se puede destacar Cierzo y Meseta. Cierzo, ya que además de su buena productividad, es la que mejor peso específico obtiene entre las de este tipo (6 carreras) y Meseta por sus buenos rendimientos, su buena adaptación a situaciones tanto frescas como semiáridas (no áridas), su buen grano y peso específico y por el momento no se le puede apuntar ninguna sensibilidad especial a las enfermedades que puedan afectar a estas cebadas.

El **trigo** es la segunda especie en superficie y supone en torno al 28% dentro de los cultivos herbáceos en secano, con tendencia a mantenerse. Su presencia es muy importante en la Baja

Montaña y en la Zona Media y muy reducida en las zonas áridas y semiáridas. Los rendimientos del trigo blando son muy altos en las zonas cerealistas del norte (Yerri, Valdizarbe y Cuenca de Pamplona), pudiéndose superar en algunos casos los 6.000 kg/ha. La producción media en Navarra es de unos 4.000 kg/ha (Vicente, Donézar, del Barrio, & San Roque, 2004).

La variedad más utilizada desde hace muchos años en los secanos de Navarra ha sido Marius, pues tiene cierta rusticidad y proporciona rendimientos aceptables. Marius se sigue sembrando pero ha sido desplazada por la variedad Berdún (Vicente et al., 2004).

Respecto a las variedades más sembradas, el antiguo ITGA (ahora INTIA) indica que se van produciendo cambios en trigo, donde “Berdún” sigue siendo casi la única variedad sembrada, con más del 90% de la superficie de los secanos en Navarra (Vicente et al., 2004). En la siguiente Tabla (1) se pueden ver las recomendaciones de variedades del ITG para Navarra (Goñi, Segura, Arnal, & Armesto, 2008).

**Tabla 1. Recomendaciones de las variedades de trigo y cebada por zonas en Navarra (Goñi et al., 2008)**

	TRIGO BLADO Ciclo corto	TRIGO BLANDO Ciclo largo	TRIGO DURO	CEBADA Ciclo largo	CEBADA Ciclo corto
<b>Baja montaña</b>	Alabanza	Boticceli		Carat 2c	Pewter 2c
	Artur Nick	Berdún		Meseta	Mandolin 2c
	Califa	Bokaro		Naturel 2c	
		Andelos		Opal 2c	
				Cierzo 6c	
<b>Zona media</b>	Alabanza	Boticceli		Gilena 2c	Belgrano 2c
	Artur Nick	Berdún		Hispanic 2c	Pewter 2c
	Califa	Bokaro		Meseta	Mandolin 2c
		Marius		Naturel 2c	
		Andelos		Opal 2c	
				Cierzo 6c	
<b>Zona árida y semi-árida</b>		Boticceli	Bólido		
		Berdún	Bolo		
		Marius			
		Andelos			

En **regadío** hay una mayor diversidad de variedades. Tanto el trigo como la cebada se siembran porque entran en rotación con cultivos hortícolas o con alfalfas, no siendo nunca el cultivo principal. Las variedades recomendadas (Tabla 2) son similares a las utilizadas en secano y, en el caso de las cebadas, se siembra una mayor superficie de cebada de primavera, que al tener un ciclo más corto encaja mejor en las rotaciones con hortícolas o con maíz. Los

rendimientos son altos, superando los 5.000 kg/ha salvo que se presenten limitaciones edáficas o problemas de encamado (Vicente et al., 2004).

**Tabla 2. Recomendaciones variedades de trigo y cebada para regadío (Goñi et al., 2008)**

TRIGO BLANDO Ciclo corto	TRIGO BLANDO Ciclo largo	TRIGO DURO	CEBADA Ciclo largo	CEBADA Ciclo corto
Alabanza (F, E)	Boticcelli	Bólido	Opal 2C	Belgrano 2C
Artur Nick	Berdún (E)	Bolo	Meseta 2C	Pewter 2C, PM
Califa (F)	Bokaro	Mellaria		Scarlet 2C, PM
Gazul (PF)				Mandolin 2C
Kilopondio				

### 2.2.2. Manejo del cultivo

Para mantener el potencial productivo de los cereales, es necesario combinarlos con cultivos que rompan el ciclo de determinadas plagas y enfermedades, cultivos que exploren otras capas de suelo diferentes al cereal, que dejen una estructura diferente del suelo, que nos faciliten la lucha contra determinadas malas hierbas difíciles de combatir en un cereal, etc. El cultivo de avena constituye una alternativa atractiva para los secanos frescos. Aunque sea un cereal, se observa que su inclusión en la rotación supone una gran ventaja sobre los cultivos de trigo y cebada. No en todas las zonas es posible la combinación con avena. No se debe sembrar en parcelas con fuerte infestación de ballueca, alopecurus, vallico, bromo, vulpia, etc. puesto que imposibilita la lucha contra las malas hierbas gramíneas que compiten con los cereales. En el caso de rotaciones con leguminosas los beneficios en la mejora de la estructura de suelo pueden repercutir en un ahorro de fertilizantes nitrogenados (Segura, Arnal, & Goñi, 2013). La elección de leguminosas, como guisante o habas dependerá del tipo de suelo y climatología, teniendo en cuenta que, especialmente los guisantes, prefieren suelos bien drenados. (itg Agrícola, 2008).

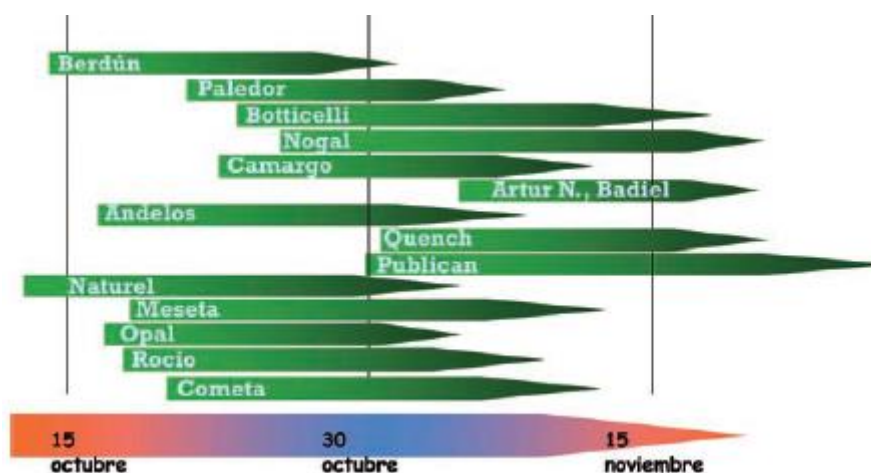
A la hora de plantear el tipo de manejo que se va a llevar a cabo hay que tener en cuenta la climatología, ya que en secano la falta de lluvias puede ser tan limitante que el agricultor se vea obligado a disminuir en lo posible los gastos, en consonancia con el rendimiento del cultivo que va a obtener. Si la lluvia no es un factor limitante, las intervenciones en el cultivo pueden ser más frecuentes y la elección de las mejores técnicas de cultivo pasa a ser algo muy relevante (Segura et al., 2013).

En un estudio realizado por el ITG (2008) se concluye que en Navarra los sistemas de **laboreo de conservación**, han demostrado ser más sostenibles al reducir la erosión del suelo y conservar mejor su materia orgánica reduciendo además el consumo de combustibles. El

laboreo de conservación, mínimo laboreo y no laboreo, son los sistemas más recomendados, siempre que no existan problemas de rodadas, compactación de suelo, exceso de residuos de cosecha en superficie, problemas fitosanitarios específicos (malas hierbas resistentes, etc.) o problemas de drenaje.

El laboreo profundo con vertedera es aconsejable realizarlo cuando haya que enterrar residuos (rastrajo, paja) de la cosecha anterior. Esta labor deberá realizarse únicamente con buenos temperos, suelo desmenuzable y hasta un máximo de 25 cm. El chisel, resulta menos costoso que la vertedera, para realizar una labor adecuada la velocidad de trabajo deberá ser de 6 a 10 km/h.

Es muy importante adaptar la variedad sembrada a la fecha de siembra (Figura 8). La invasión de malas hierbas suele ser superior en siembras tempranas. Se debe tener cuidado de no adelantar la fecha de siembra en parcelas muy infestadas. Del mismo modo, el riesgo de plagas como zabro y pulgones de otoño es también mayor en siembras tempranas. También es muy importante el ciclo del cereal: su adelanto o retraso en la maduración final. Se puede dar la paradoja de que una variedad muy alternativa (que se adelanta durante el invierno) sea de ciclo largo. Y también podemos encontrar una variedad poco alternativa o muy de invierno que no sea excesivamente tardía en su maduración final. De ahí que el conocer las variedades sea importante antes de realizar las siembras (Segura et al., 2013).



**Figura 8. Recomendaciones de INTIA para las siembras de cereal en Zona de Baja Montaña (Segura et al., 2013)**

La dosis de semilla (Tabla 3) varía dependiendo de la especie. Algunas variedades de trigos blandos, como el Berdún, necesitan dosis mayores de semilla (550 semilla/m<sup>2</sup> como referencia media), debido a sus dificultades en la implantación y al elevado número de espigas necesario para que exprese su potencial (itg Agrícola, 2008).

**Tabla 3. Recomendación densidad de siembra (itg Agrícola, 2008)**

Semilla/m <sup>2</sup>	Tipo varietal	
	Invierno	Primavera
Trigo blando	400	450
Trigo duro	450	500
Cebada	400	400

Hacer un uso eficiente del nitrógeno, fósforo y potasio (Tabla 4) es muy importante para reducir el coste y obtener el mayor beneficio posible. El nitrógeno se aporta a la salida del invierno para que el cultivo no tenga deficiencias en el periodo de máximo consumo que se produce en primavera. Solamente en algunos casos pueden ser interesantes pequeños aportes de nitrógeno en fondo, no superiores a 25-30 unidades/ha, previamente a la siembra (itg Agrícola, 2008). Se debe prestar especial atención a las variedades cuya fase de ahijamiento sea de corta duración para que no padezcan carencias de nitrógeno durante dicha fase (Segura et al., 2013).

El abonado de fondo tiene como objetivo prioritario cubrir las necesidades de fósforo y potasio. Se recomienda aportar al suelo las unidades previstas según el potencial del cultivo. En cada campaña se ajustan las cantidades según el balance de aportaciones y exportaciones del año anterior (itg Agrícola, 2008).

**Tabla 4. Recomendaciones generales para la aportación de fósforo en cereales (itg Agrícola, 2008).**

Zona	Cosecha (kg/ha)	Exportaciones U F P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Súper 45 % kg/ha
<b>Semiárida</b>	2000	20	44
<b>Intermedia</b>	3000	30	67
<b>Media</b>	4000	40	89
<b>Baja Montaña</b>	5000	50	111
	6000	60	133
	7000	70	156

## 2.3. Teledetección en agronomía.

### 2.3.1. Historia

La teledetección es una disciplina relativamente reciente cuyo origen se remonta al año 1794. Durante la batalla de Fleurus, Bélgica en la actualidad, los hermanos Montgolfier utilizaron un globo aerostático para observar los movimientos del enemigo. Desde ese día los avances de la teledetección estuvieron unidos a fines militares (Casal & Freire, 2012). En la primera Guerra Mundial, 1914-1919, ya se utilizaban cámaras instaladas en los aviones. La técnica se siguió desarrollando y ya en la segunda Guerra Mundial, 1939-1945, se usaron fotografías para realizar el mapa de la costa en el Desembarco de Normandía. Midiendo las olas cercanas a la costa se determinó la longitud de onda pudiendo calcular la profundidad del agua. También se usó película infrarroja para diferenciar la vegetación verde de las redes de camuflaje (ESA edu SPACE, 2015).

En el siguiente cronograma (Figura 9) se pueden ver los hitos más importantes de la historia de la Teledetección en España.

Año	Acontecimiento
1884	Servicio de Aeroestación Militar, por problemas de presupuesto se puso en marcha en 1889.
1913	Se llevaron a cabo las primeras actividades no militares: estudio de capas altas de la atmósfera, mapas y planos y aplicaciones meteorológicas.
1920	Servicio geográfico y laboratorio Meteorológicos de Aviación Militar, es el origen oficial de las actividades aerofotográficas en España.
1927	CEFTA, Compañía Española de Trabajos Fotogramétricos Aéreos, S.A., fundación de la primera empresa Española privada. Vuelo fotogramétrico de la Cuenca Hidrográfica del Ebro a escala 1:10000.
1942	INTA, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, instituto formado por diferentes centros que cubren tanto el campo de la aeronáutica como el aeroespacial. Con el tiempo se llevan a cabo colaboraciones con la ESA y la NASA.
1968	Según Sastre (1998) primer vuelo fotogramétrico a color sobre la Sierra de Guadarrama.
1974	INTASAT, primer satélite Español.
1975	ESA, Agencia Espacial Europea. España miembro fundador junto a Bélgica, Alemania, Dinamarca, Francia, Reino Unido, Italia, Holanda, Suecia y Suiza.
1977	SECFYT, Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección.
1986	GTT, Grupo de Trabajo en Teledetección
1988	AET, Asociación Española de Teledetección.
2000	Programa EUFAR, European Facility for Airborne Research.
2004	PNT, Plan Nacional de Teledetección. Como objetivo coordinar la adquisición de imágenes de satélite sobre el territorio Español.
2009	Deimos-1, primer satélite Español privado.

Figura 9. Cronograma sobre la Historia de la Teledetección en España (Casal & Freire, 2012)

A nivel mundial el primer satélite que se desarrolló con el fin de obtener información de los recursos disponibles en la tierra fue el Landsat-1, lanzado por la NASA el 23 de Julio de 1972. Posteriormente se pondrían en órbita sus sucesores: Landsat-2 (1975), Landsat-3 (1978), Landsat-4 (1982), Landsat-5 (1985), Landsat-6 (1993), Landsat-7 (1999) y Landsat-8 (2013). En 1992 en un esfuerzo conjunto realizado por la NASA y el USGS (U.S. Geological Survey) se creó el programa llamado “Landsat Data Continuity Mission” (LDCM) para garantizar la continuidad del suministro de información (M. Lillesand, W. Kiefer, & W. Chipman, 2008). Hasta el momento 8 satélites Landsat han sido enviados al espacio constituyendo el registro más largo de datos que se han obtenido de la superficie terrestre a nivel mundial. El último, el satélite Landsat 8, consta de dos instrumentos de ciencia-Operacional Land Imager (OLI) y el sensor infrarrojo térmico (TIRS). Estos dos sensores proporcionan una cobertura temporal de la masa terrestre mundial con una resolución espacial de 30 metros (visible, NIR, SWIR); 100 metros (térmica); y 15 metros (pancromática). Cada 16 días se obtienen datos de todas las partes de la Tierra, es decir, el satélite gira alrededor del planeta cada 99 minutos. Las bandas de longitud de onda individuales se pueden combinar en imágenes a color, las diferentes combinaciones de las 11 bandas revelan información diferente acerca del estado de la cobertura terrestre (NASA, 2013).

Con Landsat se tiene una oportunidad única para observar el uso del suelo y de la tierra. Las imágenes que ofrece son muy importantes para la comunidad científica ya que proporcionan observaciones repetitivas y sinópticas de la Tierra que de otro modo no se podrían obtener. Los datos tienen distintas aplicaciones y ayudan a la hora de tomar decisiones en distintos campos, especialmente para: la salud humana, la agricultura, el clima, la energía, el fuego, los desastres naturales, el crecimiento urbano, la gestión del agua, los ecosistemas y la biodiversidad, y el manejo forestal (NASA, 2013).

Viendo el potencial y los usos de las imágenes llegaron otros satélites con un fin más comercial que científico como la serie SPOT. La serie SPOT (Système Pour l’Observation de la Terre) se empezó a desarrollar por el Gobierno Francés en 1978, más adelante se unieron al proyecto Suecia y Bélgica. En 1986 se lanzó el SPOT-1 empezando así una nueva etapa para la Teledetección. Fue el primer satélite en incluir un sensor de matriz lineal, una técnica de exploración de empuje y un sistema óptico orientable (M. Lillesand et al., 2008).

Como ya se ha citado anteriormente las aplicaciones de los sensores remotos en la agricultura son múltiples. La aplicación directa de la interpretación visual de las imágenes se puede reunir en tres puntos (M. Lillesand et al., 2008):

- **Clasificación de los cultivos:** un cultivo específico puede ser identificado a través de su respuesta al espectro electromagnético y a la textura de la imagen. La identificación requiere un conocimiento previo del desarrollo del ciclo de cada cultivo en el área a estudiar. Esta información se suele resumir en un calendario anual. Debido a los cambios en el cultivo hay que saber en qué fechas obtener las imágenes para poder llevar a cabo la identificación. Dos cultivos en una determinada fecha pueden llegar a verse muy parecidos y en otra fecha pueden aparecer completamente diferentes. En el uso de los distintos métodos, el uso del color en el visible y el infrarrojo en las



imágenes da una ventaja respecto a las imágenes pancromáticas ya que ofrecen mayor información del espectro.

- **Agricultura de precisión:** se utilizan las imágenes para conocer con exactitud la zona donde se cumplen unas determinadas condiciones para maximizar el aprovechamiento de energía y superficie.
- **Manejo general de los cultivos:** la interpretación para el estudio del manejo de los cultivos es más complicada que para hacer una clasificación de cultivos. Es esencial tener datos de información del suelo y en muchos estudios se han hecho comparaciones entre vegetación sana y vegetación bajo condiciones de estrés en las parcelas contiguas. Toda la información complementaria es necesaria ya que es muy difícil distinguir los efectos causados por las enfermedades, insectos, deficiencias de nutrientes y falta de agua de las variaciones causadas por la variedad de especies, el grado de madurez, la densidad de siembra y las diferencias en el color del suelo.

Un uso que cada vez está más extendido es el uso de las imágenes de satélite para controlar los recursos hídricos, este tema plantea importantes ventajas en la utilización de la Teledetección en el campo del riego. El U.S. Bureau of Reclamation utiliza con éxito una combinación de imágenes térmicas y ópticas para la monitorización del uso de agua agrícola y el cálculo de la evapotranspiración. Para poder obtener datos de evapotranspiración es imprescindible trabajar con el térmico (NASA, 2013).

En el campo de la Teledetección el uso de los sensores radar para las aplicaciones agrícolas se ha estudiado sobre todo en las últimas 3 décadas (M. Henderson & J. Lewis, 1998). En 1990 es cuando más se desarrolló el uso de estas imágenes tanto para la monitorización de cultivos agrícolas como para las zonas forestales (ESA, 1995).

Los sensores activos (radar) han sufrido un gran desarrollo en los últimos años y se han llevado a cabo numerosos estudios para su aplicación por sus ventajas respecto a los sensores pasivos (ópticos). Mientras que los sensores ópticos están limitados a su uso durante el día los sensores radar se pueden utilizar también por la noche ya que no dependen de la luz solar. También han mostrado su capacidad para trabajar bajo condiciones de nubosidad y niebla (M. Lillesand et al., 2008)

Hoy en día, el reto es utilizar adecuadamente y de forma conjunta los datos radar, del visible y del infrarrojo que en las distintas bandas del espectro electromagnético son capaces de señalarnos distintos tipos de información complementaria (M. Lillesand et al., 2008).

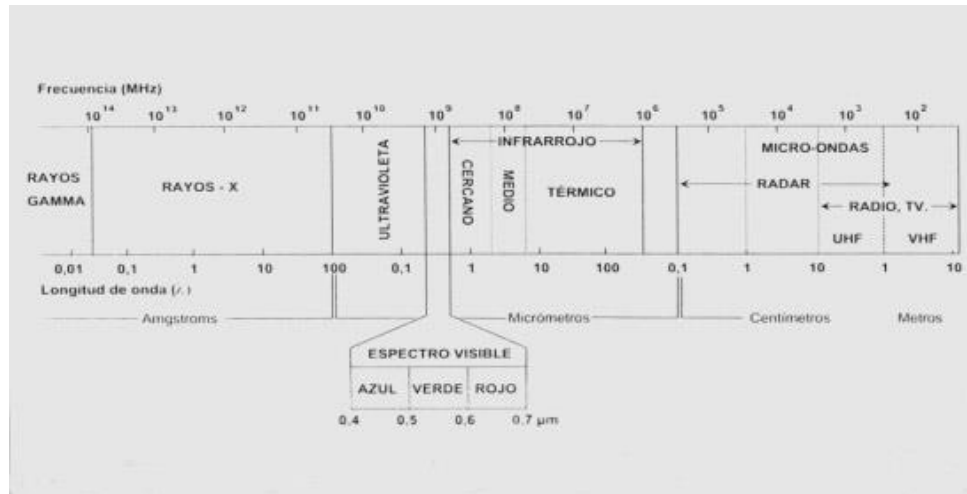
### 2.3.2. Imágenes ópticas

Las imágenes ópticas se obtienen de los **sensores pasivos**. Se fundamentan en que el sensor recoge el flujo reflejado por la cubierta de la superficie terrestre de la energía proveniente del sol o de la directamente emitida por la superficie terrestre. El flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electro-magnética (Chuvieco Salinero, 1990).

Cuando la **energía electromagnética** incide en la superficie terrestre diferentes fracciones de energía son reflejadas, absorbidas o transmitidas dependiendo del material con el que entren en contacto. Estas diferencias son las que nos permiten distinguir en la imagen las distintas superficies. Dentro de una misma superficie dependiendo de la longitud de onda del espectro electromagnético (Figura 10) que reciba las fracciones reflejadas, absorbidas o transmitidas varían. Esta es la base de los sensores multispectrales, que trabajan en varias bandas del espectro. De esta forma dos superficies se pueden llegar a distinguir muy fácilmente en un rango del espectro en concreto y puede ser imposible de apreciar ninguna diferencia en otro (Chuvieco Salinero, 2002).

Desde el punto de vista de la teledetección hay que destacar una serie de bandas espectrales (Chuvieco Salinero, 2002):

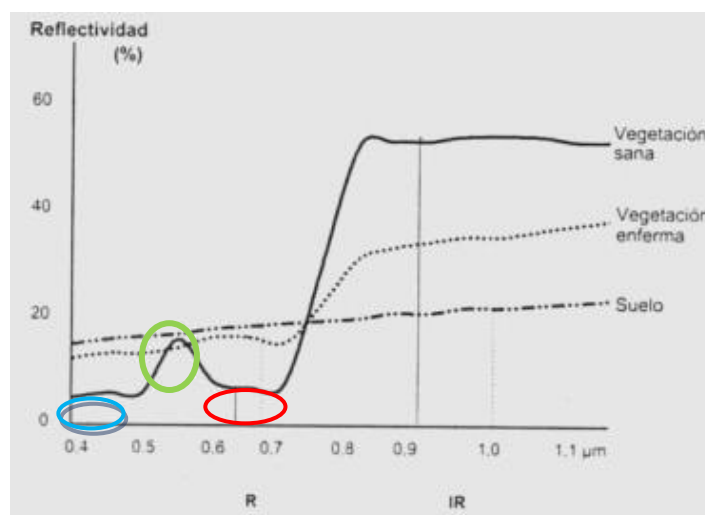
- **Espectro visible** (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ): la única parte que puede percibir el ojo humano, coincide con las longitudes de onda donde es máxima la radiación solar. Se distinguen 3 bandas principales (los colores primarios): azul (A: 0,4-0,5  $\mu\text{m}$ ), verde (V: 0,5-0,6  $\mu\text{m}$ ) y rojo (R: 0,6-0,7  $\mu\text{m}$ ).
- **Infrarrojo cercano** (IRC: 0,7-1,3  $\mu\text{m}$ ): importante por su capacidad para discriminar masas vegetales y contenido de humedad.
- **Infrarrojo medio** (IRM: 1,3-8  $\mu\text{m}$ ): para el uso agronómico interesa el rango comprendido entre 1,3 y 2,5  $\mu\text{m}$  donde es fácil estimar el contenido de humedad de la vegetación o los suelos.
- **Infrarrojo lejano o térmico** (IRT: 8-14  $\mu\text{m}$ ): se utiliza para detectar el calor que proviene de la mayor parte de las superficies terrestres.
- **Microondas** (M > 1 mm): esta banda es interesante por su transparencia a la cubierta nubosa y es donde se trabaja con los sensores radar.



**Figura 10. Espectro electromagnético (Scan Terra, 2015).**

Los rangos del espectro electromagnético para los que la atmósfera es transmisiva (o transparente) se llaman “ventanas del espectro electromagnético”. Los sensores quedan limitados a trabajar a través de estas ventanas. Lo más importante es la interacción y la dependencia entre la fuente primaria de energía, las ventanas atmosféricas y la sensibilidad del sensor, estas tres características se tienen que tener en cuenta a la hora de elegir el sensor con el que se va a trabajar. También es importante la forma en que la energía interactúa con la superficie de estudio (M. Lillesand et al., 2008).

El gráfico donde se representa la reflectancia de un objeto en función de la longitud de onda se llama firma espectral (M. Lillesand et al., 2008). La caracterización de las firmas espectrales de la vegetación es la clave para el uso en el ámbito de la agricultura de la teledetección en el óptico.



**Figura 11. Firma espectral de la cubierta vegetal sana, enferma y el suelo (Scan Terra, 2015)**

En la Figura 11 se ven las firmas espectrales de una cubierta vegetal sana, enferma y del suelo. La firma espectral dependiendo del tipo de cultivo o del tipo de suelo puede variar, estas diferencias son las que permiten distinguir un tipo de cultivo de otro. Normalmente la vegetación sana muestra un pico en la banda del verde. Esto es debido a que en la vegetación las variaciones en el visible dependen directamente de los pigmentos de las hojas, por ejemplo, la clorofila. Cuando nos acercamos al infrarrojo cercano la reflectancia de la vegetación sana crece dramáticamente ya que en este rango la hoja refleja un 40/50 % de la energía incidente debido a la estructura interna de las hojas. Es gracias a la gran variabilidad de esta estructura interna lo que permite distinguir muchas especies en el IRC cuando es imposible diferenciarlas en el visible. Cuando la planta sufre un estrés puede decrecer la producción de clorofila y por lo tanto la absorción en la banda del azul y del rojo disminuye. Esto se refleja como se ve en la vegetación enferma en un aumento de la reflectancia en ambas bandas y un menor salto en el infrarrojo (M. Lillesand et al., 2008).

La reflectividad de una superficie puede ser perturbada por la acción de factores externos a la misma, los más importantes son los relacionados con la configuración de la observación y la iluminación, así como la atmósfera (Gilbert, González-Piqueras, & García-Haro, 1997). La atmósfera se encuentra entre la superficie terrestre y el sensor y también refleja y absorbe parte de la energía. El reflejo, es decir, la dispersión atmosférica se produce por las partículas en suspensión y es difícil de estimar. La dispersión puede suponer un aumento o una disminución de la energía que es devuelta al sensor. La absorción supone pérdida de energía sobre todo por parte del vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono. Estos gases tienden a la radiación en determinadas bandas (M. Lillesand et al., 2008).

El reto de la Teledetección es estudiar la vegetación a partir de medidas de reflectividad sin que influyan los factores externos entre los que hay que aislar la reflectividad del suelo. La solución a este problema son los llamados Índices de Vegetación (IV). Teóricamente un IV se

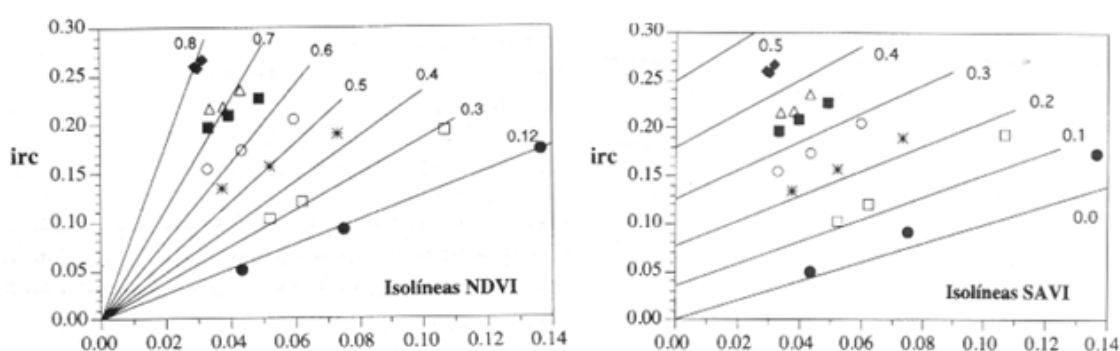
puede definir como “un parámetro calculado a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas”. Como prácticamente el 90 % de la información relacionada con la vegetación está contenida en las bandas del rojo y el infrarrojo cercano la mayoría de los IV tiene en común que trabajan en esas dos bandas (Gilabert et al., 1997).

En la siguiente Tabla (5) se pueden ver los Índices de Vegetación más utilizados.

**Tabla 5. Índices de Vegetación más usados en teledetección (Prabhakara, Hively, & McCarty, 2015)**

Index	Name	Citation	Formula
NDVI	Normalized difference vegetation index	Tucker (1979)	$(NIR - R)/(NIR + R)$
GNDVI	Green normalized difference vegetation index	Moges et al. (2004)	$(NIR - G)/(NIR + G)$
SR	Simple ratio	Tucker and Sellers (1986)	$NIR/R$
SAVI	Soil-adjusted vegetation index ( $L=0.5$ )	Huete (1988)	$[(NIR - R)/(NIR + R + L)](1 + L)$
G - R	Green minus red		$G - R$
EVI	Enhanced vegetation index	Huete et al. (2002)	$2.5(NIR - R)/(NIR + 6 \times R - 7.5 \times B + 1)$
TVI	Triangular vegetation index	Broge and Leblanc (2000)	$0.5[120(NIR - G) - 200(R - G)]$
NGRDI	Normalized green red difference index	Tucker (1979)	$(G - R)/(G + R)$
VARI	Visible atmospherically resistant index	Gitelson et al. (2002)	$(G - R)(G + R - B)$
NDREI	Normalized difference red edge index	Gitelson and Merzlyak (1994)	$(RE - R)/(RE + R)$

Rouse et al. (1974) propusieron el NDVI, “Normalized Difference Vegetation Index”, que consiste en la diferencia normalizada de las dos bandas (la del rojo y el infrarrojo cercano) y al estar normalizado su rango de variación está comprendido entre -1 y +1. Aunque es sensible a variaciones debidas al suelo o la atmósfera es uno de los índices más utilizados. La influencia de estos dos factores externos puede deberse a que da lugar a isóneas convergentes en el origen y no paralelas a los parámetros de la vegetación como el LAI (Figura 13) (Gilabert et al., 1997).



**Figura 12. Ejemplos de isóneas de NDVI y SAVI para distintos valores de LAI (Gilabert et al., 1997)**

En 1998 Huete tuvo la idea de que las isolíneas de la vegetación convergen en un punto situado sobre la bisectriz de la región negativa del plano (Tabla 5), es decir, en  $r = -I_1$  e  $Irc = -I_2$ , siendo  $I_1 = I_2$ . Basándose en esta idea definió el “Soil Adjusted Vegetation Index” (SAVI). La principal desventaja es la determinación del parámetro  $I$ , se recomienda:

$I = 1$ , para densidades bajas

$I = 0,5$ , para valores intermedios

$I = 0,25$ , para densidades altas

Los Índices de Vegetación se pueden utilizar para la estimación de la cantidad de biomasa (Gitelson, 2004) y para conocer el porcentaje de cobertura del suelo (Purevdorj, Tateishi, Ishiyama, & Honda, 1998). El uso de más de un Índice es útil sobre todo cuando hay poca vegetación y la influencia del suelo interfiere con la señal de la vegetación (Huete, 1988). Cuando el nivel de biomasa es alto la relación entre la biomasa y la estructura de la cubierta puede ser complicada. Esto conlleva a que determinados Índices como el NDVI se saturan cuando la estructura es muy compacta y un aumento en la biomasa no supone un aumento en la reflectancia (Myneni & Williams, 1994).

Cuando el estudio se reduce a muestras tempranas, SR, EVI, NGRD, VARI y NDREI demuestran una limitación a la hora de detectar diferencias útiles porque la cantidad de biomasa es pequeña y, al contrario, cuando hay una gran cantidad de biomasa. Mientras que el NDVI, GNDVI, SAVI y el G-R funcionan mejor con poca cantidad de biomasa también se saturan con grandes cantidades (Prabhakara et al., 2015). Cuando el nivel de vegetación es bajo o medio se recomienda utilizar el NDVI (Broge & Leblanc, 2001) y cuando el nivel de vegetación es algo el TVI (Chen, Gu, Shen, Tang, & Matsushita, 2009).

### 2.3.3. Imágenes radar

Los radares son **sensores activos** y como tales emiten una señal de energía electromagnética que llega a la superficie de estudio y guardar la señal de retorno con la información obtenida. Al no depender de la luz solar una ventaja importante es la posibilidad de trabajar las 24 horas del día (M. Henderson & J. Lewis, 1998).

La Ecuación Fundamental del Radar (Figura 14) es la que relaciona las características del radar, las del objeto observado y las de la señal recibida. La magnitud física que mide el sensor es la intensidad de la radiación retrodispersada, la cual depende del Coeficiente de Retrodispersión o backscattering ( $\sigma^0$ ) de cada superficie. Cada tipo de cubierta tiene un Coeficiente de

Retrodispersión o Reflectividad Radar promedio que depende principalmente de su conductividad o constante dieléctrica y de sus características geométricas (Marchionni & Cavayas, 2014).

$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma$	<p><math>P_r</math> = Potencia retrodispersada</p> <p><math>P_t</math> = Potencia transmitida por el sensor</p> <p><math>G</math> = Factor de ganancia de la antena</p> <p><math>R</math> = Distancia de sensor-superficie</p> <p><math>\sigma</math> = Sección eficaz de retrodispersión</p>
---------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Figura 13. Ecuación Fundamental del Radar (Marchionni, Daniela S., Cavayas, François, 2014)**

Este tipo de sensores trabajan en la región del espectro electromagnético de las microondas, que incluyen longitudes de ondas desde 1 mm hasta 1 m. Trabajar en la región de las microondas mejora la penetración (disminuye la atenuación), un aspecto muy importante a tener en cuenta en el caso de la distorsión provocada por la atmósfera. A las imágenes radar no les afecta ni las nubes ni la neblina, es decir, no dependen de las condiciones meteorológicas. En concreto, las nubes pueden afectar si se trabaja en longitudes de onda cercanas a los 2 cm y la lluvia entorno a los 4 cm (M. Henderson & J. Lewis, 1998).

Las bandas microondas más usadas en teledetección son la L (15-30 cm), la C (3,75-7,5 cm) y la X (2,4-3,75 cm) (M. Henderson & J. Lewis, 1998)

Principalmente hay 3 parámetros que caracterizan el flujo emitido por el radar, a continuación se valoran desde la perspectiva en la que el objetivo de estudio es la vegetación:

- **Frecuencia o longitud de onda (banda):** la magnitud de la retrodispersión depende de ella debido a:
  - Diferencias en la constante dieléctrica del agua en función de la frecuencia.
  - La relación entre la longitud de onda y el tamaño de la planta y la profundidad de penetración.

Conforme disminuye la frecuencia el poder de penetración aumenta en los cultivos. Por lo tanto las bandas con alta frecuencia como la X presentan poco poder de penetración, por el contrario la banda L que tiene menos frecuencia su poder de penetración es mayor. Cuando se quiere obtener más información sobre el cultivo se utilizan las altas frecuencias (banda X) (M. Henderson & J. Lewis, 1998).
- **Polarización:** la dirección del vector eléctrico de la onda electromagnética es útil para hacer discriminaciones en el análisis de una imagen SAR (M. Henderson & J. Lewis,

1998). La dirección de polarización influye tanto en la interacción con el medio (grado de penetración) como en el flujo de retorno que registrará el radar (Elachi et al., 1990). En la aplicación radar se realiza una combinación lineal de las polarizaciones verticales y horizontales dando lugar a distintas combinaciones: HH, VV, HV y VH (HV = VH, polarización cruzada) (Figura 15) (Marchionni & Cavayas, 2014).

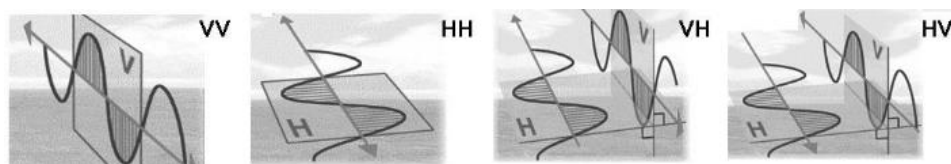


Figura 14. Polarización (Marchionni & Cavayas, 2014)

La polarización vertical interactúa mejor con los tallos verticales que la polarización horizontal (ESA, 1995). Por ello es la que mejor facilita la distinción de los cultivos. La polarización horizontal que ha demostrado tener mayor poder de penetración y por tanto devuelve más información del suelo (M. Henderson & J. Lewis, 1998).

- **Ángulo de incidencia:** del radar en un punto determinado es el ángulo medido entre el haz del radar y la normal a la superficie del terreno en ese punto (Figura 16); este ángulo varía a lo largo del ancho de barrido aumentando desde el alcance cercano hacia el lejano (Marchionni & Cavayas, 2014). Afecta al grado de penetración porque determina la trayectoria a través del canopy. Si el ángulo es pronunciado, es decir, unos  $23^\circ$  favorece la obtención de datos del suelo (ESA, 1995).

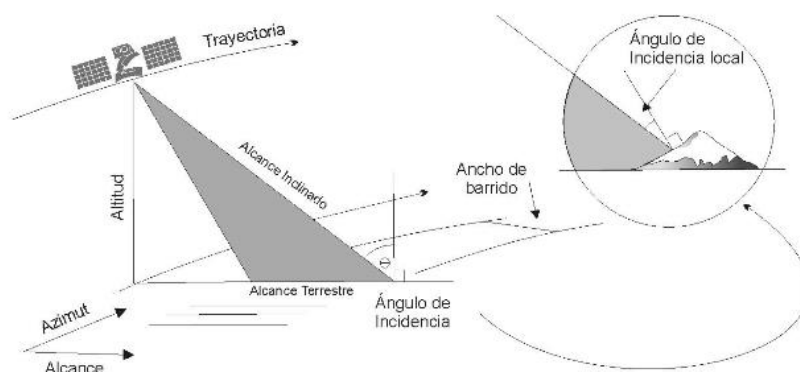
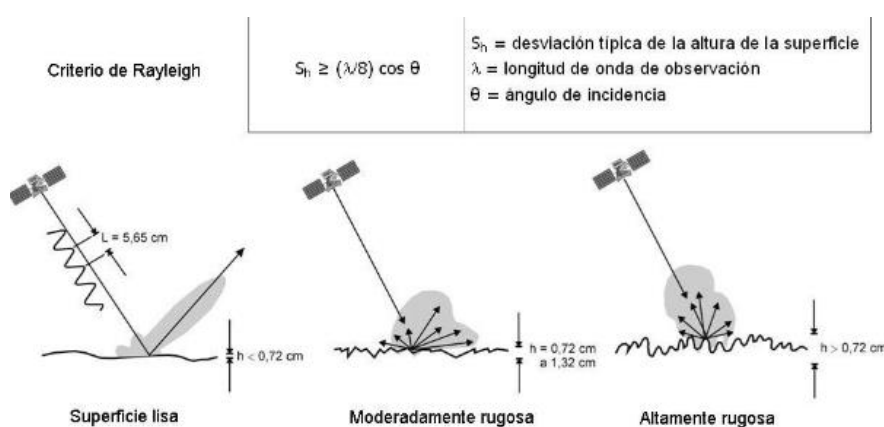


Figura 15. Geometría de la observación de un sistema radar (Modificado de Raney, 1992)



En ausencia de vegetación el Coeficiente de Retrodispersión ( $\sigma^0$ ) de cada superficie depende de 3 factores:

- **Rugosidad:** incide directamente en la intensidad de la señal de retorno que aumenta al aumentar la rugosidad. Se puede relacionar con la longitud de onda de la señal y el ángulo de incidencia. Según el criterio de Rayleigh (Figura 17) si la rugosidad del terreno es la misma, aparecerá más liso para longitudes de onda mayores y/o ángulos de incidencia menores. Para una superficie lisa casi toda la energía es reflejada hacia fuera (reflexión especular) y la señal de retorno es nula. Conforme una superficie se vuelve rugosa la energía incidente empieza a dispersarse en todas las direcciones (Marchionni & Cavayas, 2014)



**Figura 16. Respuesta radar de superficies de distinta rugosidad siguiendo el criterio de Rayleigh (Marchionni & Cavayas, 2014)**

- **Propiedades dieléctricas:** cuanto mayor es el contenido de humedad de una cubierta mayor es su constante dieléctrica y más potente la señal de retorno que detecta el radar (M. Henderson & J. Lewis, 1998).
- **Propiedades geométricas:** es decir, la pendiente y orientación de la superficie observada condiciona el ángulo de incidencia local de la señal del radar con un efecto importante en la señal de retorno. Las pendientes orientadas hacia el radar adquieren en la imagen tonos más claros (Marchionni & Cavayas, 2014).

En cubiertas vegetales son dos los elementos que condicionan el coeficiente de retrodispersión (M. Henderson & J. Lewis, 1998):

- **Propiedades dieléctricas de la cubierta vegetal:** que representa el contenido de humedad de la misma, generalmente en unidades por área (kg H<sub>2</sub>O por m<sup>2</sup> o ha), lo que suele relacionarse con la cantidad de vegetación o biomasa.
- **Propiedades geométricas de la cubierta vegetal:** que representa la arquitectura de la cubierta en términos de ángulos y dimensiones de sus componentes (tallos, hojas, espigas, etc.).

Se han desarrollado experimentos tanto teóricos como prácticos, la mayoría para la banda-C, (McNairn & Brisco, 2004) que demuestran la sensibilidad de las microondas a la vegetación y al suelo (contenido de agua de la planta, LAI, humedad y rugosidad del suelo). En ellos se han observado relaciones entre los distintos parámetros de la vegetación, como la biomasa o el LAI, con el ratio de las polarizaciones HH y VV adquiridos en la banda-C con un ángulo de incidencia grande y con una baja sensibilidad a la humedad del suelo (Brown, Quegan, Morrison, Bennett, & Cookmartin, 2003; Mattia et al., 2003).

En la banda-C se han identificado las polarizaciones HV y VV como las mejores para la clasificación de cultivos. En HH se ha observado una menor influencia de la cubierta vegetal y una mayor sensibilidad a las variaciones de humedad y rugosidad del suelo (Larranaga, Alvarez-Mozos, Albizua, & Peters, 2013). Es importante el estado de desarrollo del cultivo en el resultado de la retrodispersión obtenida tanto para la información de la vegetación como para el suelo (Mattia et al., 2003).

En el caso específico del trigo en la banda-C se ha relacionado la biomasa fresca con la polarización HH (ángulo de incidencia de 23°) o con VV (ángulo de incidencia de 40°) hasta el comienzo del desarrollo de los tallos y la polarización HH (ángulo de incidencia 40°) hasta el espigado. Se ha visto también que la polarización VV (ángulo de incidencia 23°) está relacionada con la biomasa fresca a través de la atenuación del suelo. Después del espigado ninguna medida individual ha aportado ninguna información, todos los datos quedan relacionados con la humedad del suelo (Mattia et al., 2003).

En estudios realizados sobre la banda-X se ha visto una clara sensibilidad del coeficiente de retrodispersión respecto al LAI en fresco en las plantas de trigo y cebada (en ambas polarizaciones VV y HH). Cabe destacar que para la banda-X no se ha apreciado la influencia de la humedad del suelo, ni siquiera en HH. Cuando la planta está seca la sensibilidad del LAI es inexistente por lo que se demuestra la influencia de las propiedades dieléctricas en la señal de retorno (Fontanelli, Paloscia, Zribi, & Chahbi, 2013).

La mayoría de los trabajos se han centrado hasta el momento en la banda-C de las microondas debido a su mayor poder de penetración. Gracias a los buenos resultados que se están obteniendo en la banda-X es interesante estudiar más detalladamente este campo.

### **3. Objetivos**

El objetivo principal de este trabajo fin de grado es evaluar la utilidad de las técnicas de teledetección radar para el seguimiento de la producción de biomasa en cereal, centrándose específicamente en trigo y cebada. Para ello, se realizó en el año 2012 un seguimiento en campo de distintas parcelas de trigo y cebada durante todo su ciclo, las parcelas están localizadas en el Valle de Egües y sus proximidades.

Coincidiendo esta campaña se adquirió una serie de imágenes Terrasar-X, satélite alemán con un sensor radar en la banda-x.

En este trabajo se han procesado dichas imágenes y se ha añadido su sensibilidad a los distintos parámetros del cultivo y de suelo medidos en campo.

## 4. Metodología empleada

### 4.1. Medios materiales

#### 4.1.1. Ubicación de la zona de estudio

Las parcelas utilizadas para el trabajo son 9 y se encuentran repartidas entre los Municipios de Egües, Lizoáin y Lónguida, al este de Pamplona en la Zona Media de Navarra (Figura 18).

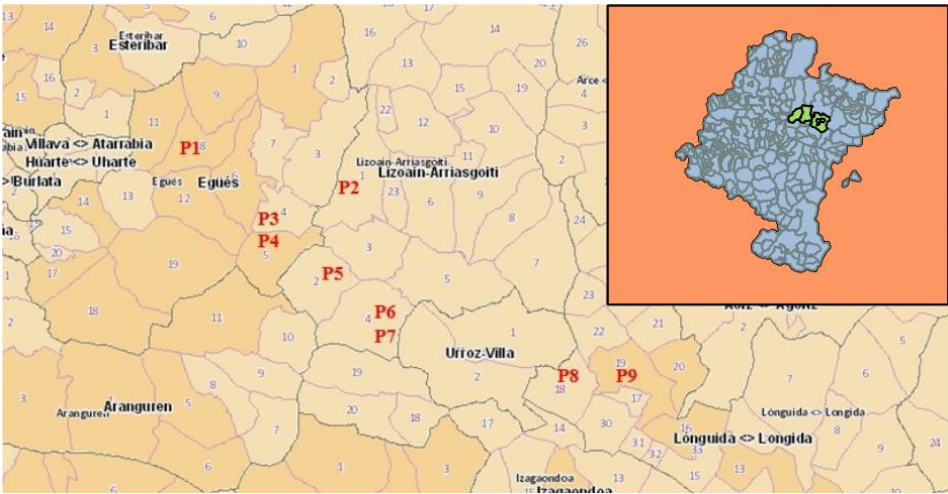


Figura 17. Localización de las parcelas en sus respectivos municipios (IDENA, 2015).

En la Tabla 6 se puede ver la información básica del catastro sobre cada parcela y el cultivo trabajado en el año 2012. Las distintas subparcelas y la imagen de cada una de ellas se pueden consultar en el Anexo 1.

Tabla 6. Información Catastral y de cultivo de las parcelas

	Municipio	Polígono	Parcela	Superficie ( ha )	Cultivo	Variedad
P1	Egües	8	122	2,85	Trigo blando	Bokaro
P2	Lizoáin	1	111	6,69	Cebada	Meseta
P3	Egües	4	7	3,01	Cebada	Meseta
P4	Egües	5	30	5,89	Trigo blando	García
P5	Lizoáin	2	65	2,48	Cebada	Meseta
P6	Lizoáin	4	55	4,7	Trigo blando	Camargo
P7	Lizoáin	4	59	5,46	Cebada	Opal
P8	Lónguida	18	21	23,77	Cebada	Meseta
P9	Lónguida	19	107	6,89	Trigo blando	Berdún

#### **4.1.2. Manejo del cultivo**

En la Tabla 7 se recoge el manejo que los agricultores han llevado a cabo en cada parcela, desde los trabajos preparatorios de suelo hasta la cosecha. Los trabajos cambian de unas parcelas a otras dependiendo de las acciones que los agricultores consideren necesarias en función de las características de las parcelas y las variedades de cultivos que siembran.

Las labores realizadas se han agrupado en 7 categorías, cada una diferenciada por un color:

Tabla 7. Manejo del cultivo en las parcelas

		Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4	Parcela 5	Parcela 6	Parcela 7	Parcela 8	Parcela 9
2011	Julio			Labrar						
	Agosto	Labrar							Labrar	
	Septiembre	Grada rotativa	Labrar+Rastra y molón	Grada rotativa	Labrar+Rastra y molón		Labrar + Grada rotativa	Labrar		Labrar
		Super 45% 165 kg/ha	Super 45% 143 kg/ha		Super 45% 164 kg/ha + 7-10-6 164 kg/ha					
	Octubre	Molón	Molón	Cebada Meseta 190 kg/ha	Trigo b. García 210 kg/ha	Labrar	Grada Rotativa	Grada Rotativa	Abonado Fondo Super 45 170 kg/ha	Rastra
		Trigo b. Bokaro 165kg/ha	Cebada Meseta 150 kg/ha						Grada rotativa	Abonado Fondo 7-10-6 200 kg/ha
	Noviembre	Javelo 4 l/ha	Javelo 4 l/ha	Javelo 4 l/ha	Arelar 4 l/ha + Pearl 20 gr/ha			Splendor 1,2 l/ha	Exal 2 l/ha	Trigo b. berdún 230 kg/ha
	Diciembre						Atlantis 500 gr/ha + Yard 1 l/ha			
2012	Enero	Urea 46% 330 kg/ha	Urea Sulfato 198 kg/ha	Urea Sulfato 220 kg/ha	Urea Sulfato 280 kg/ha	Javelo 2 l/ha	Urea Sulfato 250 kg/ha	Mohican 275 gr/ha Urea Sulfato 220 kg/ha	Abonado cobertera Urea Sulfato 200 kg/ha	Abonado cobertera Urea Sulfato 210 kg/ha
	Febrero	Urea 46% 352 kg/ha				Javelo 2 l/ha				
	Marzo	Axial 0,6 l/ha	Axial 0,6 l/ha	Urea Sulfato 220 kg/ha	Urea Sulfato 246 kg/ha	Urea Sulfato 275 kg/ha	Urea 46% 270 kg/ha	Urea 46% 180 kg/ha	Axia + Adigor 0,6 + 1,2 l/ha	Abonado cobertera Urea 46% 293 kg/ha
			Urea Sulfato 176 kg/ha	Axial 0,6 l/ha	Axial 0,5 l/ha				Abonado cobertera Urea 45% 200 kg/ha	Axial 0,6 l/ha
	Abril	Mystic 1,25 l/ha								
	Mayo	Escolta 0,33 l/ha			Escolta 0,25 l/ha					Adigor 0,25 l/ha
	Junio									
	Julio									

Man. Suelo	Sembrar	Abonado	Herbicida	Fungicida	Insecticida	Cosecha
------------	---------	---------	-----------	-----------	-------------	---------

#### 4.1.3. Datos de campo e imágenes radar.

Los **datos de campo** (Anexo 2) fueron tomados entre los meses de Marzo y Julio del 2012. Las parcelas estaban todas ellas cultivadas con cereal (trigo o cebada). Hay que tener en cuenta que había 4 variedades de trigo: Berdún, Bokaro, Camargo y García y dos variedades de cebada: Opal y Meseta. En todas las parcelas se midieron seis parámetros: **Humedad del suelo, Estado fenológico, Biomasa seca, Biomasa fresca, y Altura de la cubierta**. Además se calcularon dos parámetros derivados: **Índice de biomasa** y la **Humedad de la cubierta**.

Las **imágenes radar** utilizadas para el proyecto fueron captadas por el satélite TerraSAR-X. Es un satélite alemán puesto en órbita en 2007 y que opera en la banda-x. TerraSAR-X tiene distintos modos de adquisición de imagen, cada uno con unas características concretas en cuanto a cobertura, resolución espacial y polarización (Tabla 8).

**Tabla 8. Características de las imágenes TerraSAR-X (AIRBUS defence and space, 2014)**

MODO	RESOLUCIÓN (m)	COBERTURA (km)	POLARIZACIÓN	ÁNGULO INCIDENCIA (°)
HighRes SpotLight 300 MHz	1,1	10 X 15	single (VV o HH)	20 - 55°
SpotLight (SL)	1,7	10 x 10	single (VV o HH)	20 - 55°
	3,4		dual (HH&VV)	
StripMap (SM)	3,3	30 x 50	single (VV o HH) dual (HH&VV, HH&HV, VV y VH)	20 - 55°
	6,6	15 x 50		
ScanSar (SC)	18,5	100 x 150	single (VV o HH)	20 - 45°
WideScansar (WS)	40	270 X 200	single (VV, HH, HV o VH)	15,6 - 49°

TerraSAR-X ofrece cuatro niveles de producto (AIRBUS defence and space, 2014):

- **Single Look Slant Range Complex (SSC):** se obtiene con una sola observación, los datos aparecen como números complejos que contienen información de amplitud y fase.
- **Multi Look Ground Range Detected (MGD):** producto obtenido por multiobservación, se ha reducido el ruido y cuyos pixeles son aproximadamente cuadrados; las coordenadas de la imagen están orientadas en la dirección de vuelo y a lo largo de su huella en el terreno.
- **Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC):** producto por multiobservación, remuestreado y proyectado en el elipsoide de referencia WGS84, asumiendo una altura promedio.
- **Enhanced Ellipsoid Corrected (EED):** producto detectado multi-observación, ortorrectificado y en el cual las distorsiones de la imagen causadas por las variaciones

en la altura del terreno se compensan utilizando un DEM disponible para todo el globo.

La adquisición de imágenes TerraSAR-X funciona bajo pedido, por lo que es un sensor especialmente indicado para el seguimiento de emergencias o desastres naturales. En este trabajo se han usado 9 imágenes TerraSAR-X cuyos detalles se resumen en la Tabla 9:

**Tabla 9. Características imágenes radar utilizadas en el proyecto**

FECHA	HORA	MODO	NIVEL	POLARIZACIÓN	ÁNGULO DE INCIDENCIA
03-mar	6:19:44	SM	MGD	VV/VH	42,7 <sup>o</sup>
03-abr	17:50:28	SM	MGD	VV/VH	42,9 <sup>o</sup>
17-abr	6:19:45	SM	SSC	VV/VH	42,7 <sup>o</sup>
09-may	6:19:49	SM	SSC	VV/VH	42,8 <sup>o</sup>
20-may	6:19:47	SM	SSC	VV/VH	42,6 <sup>o</sup>
31-may	6:19:48	SM	SSC	VV/VH	42,7 <sup>o</sup>
11-jun	6:19:48	SM	SSC	VV/VH	42,7 <sup>o</sup>
22-jun	6:19:04	SM	SSC	VV/VH	42,7 <sup>o</sup>
14-jul	6:19:49	SM	SSC	VV/VH	42,9 <sup>o</sup>

#### **4.1.4. Software**

El programa utilizado para el tratamiento de las imágenes radar es el **Sentinel-1 Toolbox (S1TBx)**. Es una herramienta de uso libre desarrollada por la ESA (Agencia Espacial Europea) con el que se pueden tratar y extraer datos de las imágenes radar. S1TBx permite realizar los principales procesos y correcciones a aplicar a las imágenes radar. Para saber más sobre el uso del programa ir al tutorial del Anexo 3.



## 4.2. Método de análisis

### 4.2.1. Obtención de los datos de campo

Para que la toma de datos fuera representativa las muestras se tomaron de 4 puntos de las parcelas. Los parámetros se midieron o calcularon de la siguiente forma:

**Humedad del suelo ( $\text{cm}^3 \times \text{cm}^{-3}$ ):** se midió con una sonda TDR Campbell calibrada con medidas adquiridas con el método termogravimétrico.

**Estado fenológico:** observación visual con la escala de Zadoks.

**Biomasa ( $\text{kg/ha}$ ):** se segó para cada muestra una hilera de cereal de 1 metro de longitud en cada punto de medida. Las muestras de biomasa fresca se deben de pesar antes de que pierdan agua. Una vez medida la biomasa fresca, las muestras de se secaron en una estufa a  $60^\circ \text{C}$  durante un mínimo de 24 horas hasta eliminar toda la humedad, es decir, hasta conseguir un peso constante, para obtener la biomasa seca. Midiendo la distancia entre hileras se calculó el dato de biomasa referido a superficie.

**Humedad de la cubierta:** una vez obtenidos los datos de biomasa fresca y húmeda se obtiene la cantidad de agua que contiene la vegetación por hectárea restando ambos valores.

**Altura de la cubierta:** medición de la altura en cm.

**Índice de biomasa:** índice obtenido como el producto del marco de plantación y la altura de la cubierta.

### 4.2.2. Obtención de los datos radar

Para poder trabajar de una forma correcta con la información que necesitamos en el proyecto es necesario tratar las imágenes. El procesamiento se lleva a cabo en los 4 pasos que se pueden ver en la Figura 18.

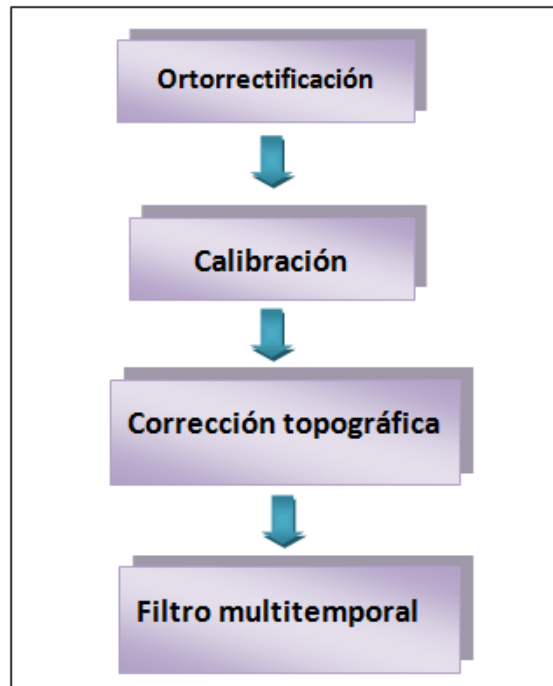


Figura 18. Proceso seguido en el tratamiento de las imágenes radar

### Ortorrectificación

La distorsión geométrica se corrige utilizando un Modelo de Elevación Digital (DEM) sobre el que se proyecta la imagen. El objetivo es obtener el sistema de coordenadas real de la imagen.

En zonas con relieve se producen las siguientes distorsiones (Figura 19) (ESA, 1995):

- **Forehortening o acostamiento de laderas:** el periodo de tiempo durante el cual un pulso radar entra en contacto con una superficie determina la longitud de su pendiente. El resultado es un acortamiento de las pendientes que miran al sensor.
- **Layover o superposición:** la secuencia en la que se crean los puntos de la imagen produce una inversión del terreno en ella. La parte superior del terreno al estar más cerca del sensor radar es lo primero que se registra produciéndose así la inversión. Esto ocurre en terrenos más abruptos que en el caso anterior.
- **Shadow o sombra:** a la parte trasera de las montañas o de cualquier objetivo no llegan los pulsos radar por lo que no se obtiene información de ellas.

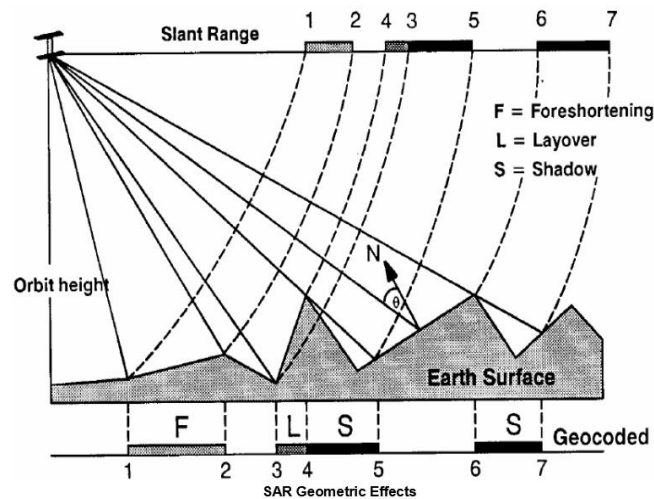


Figura 19. Efectos geométricos de las imágenes SAR (ESA, 1995)

La ortorrectificación de TerraSAR-X a en S1TBx utiliza modelos matemáticos rigurosos que se nutren de información orbital precisa del satélite. Estos algoritmos permiten corregir las distorsiones geométricas asociados a los tres casos mencionados. Estos modelos no requieren de puntos de control ya que proporcionan muy buenos resultados.

### Calibración radiométrica

La calibración consiste en calcular el coeficiente de retrodispersión ( $\sigma^0$ ) (Figura 20) a partir de los Niveles Digitales (ND) originales de la imagen. Permite minimizar las diferencias en la radiometría de la imagen y poder comparar distintas imágenes de TerraSAR-X con diferentes ángulos de incidencia, con geometría ascendente o descendente y con diferente dirección de visión (M. Henderson & J. Lewis, 1998).

$$\sigma^0 = \beta_0 \cdot \sin \theta_{loc}$$

$\theta_{loc}$  = ángulo de incidencia local  
 $\beta_0$  = radar brightness (iluminación)

Figura 20. Ecuación Coeficiente de retrodispersión,  $\sigma^0$  (AIRBUS defence and space, 2014)

La calibración radiométrica corrige la imagen de forma que cada pixel represente el  $\sigma^0$  real que ha reflejado la superficie observada; se calcula  $\sigma^0_{VV}$ ,  $\sigma^0_{HH}$  y el ratio  $\sigma^0_{VH} / \sigma^0_{VV}$  (ESA, 2015).

El coeficiente de retrodispersión es adimensional ( $m^2/m^2$ ). Para que los valores sigan una distribución más normal se suele expresar en forma logarítmica en dB (Figura 21).

$$\sigma^0_{dB} = \beta^0_{dB} + 10 \log_{10} (\sin \theta_{loc})$$

**Figura 21. Conversión a dB (AIRBUS defence and space, 2014)**

### **Corrección topográfica**

La topografía produce también una serie de alteraciones radiométricas, ya que al variar el ángulo de incidencia local el proceso de reflexión se ve afectado y los valores de  $\sigma^0$  cambian (ESA, 1995).

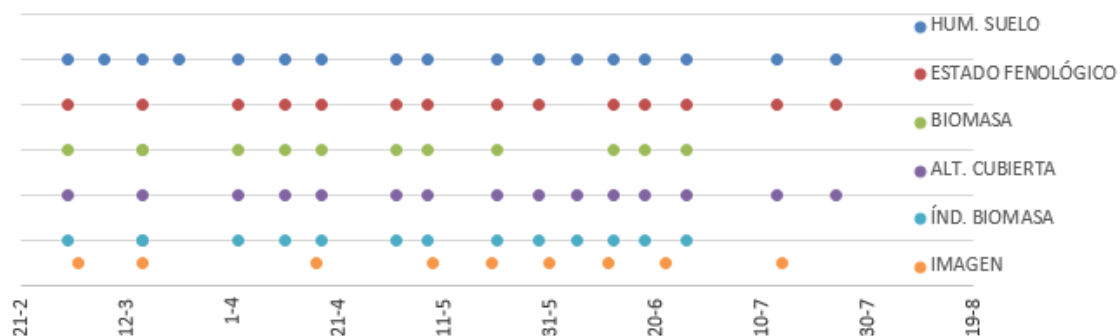
### **Filtro multitemporal**

El speckle o ruido debe ser eliminado antes de proceder a la utilización de los datos. Es crucial el orden de aplicación de los algoritmos en las imágenes radar, dado que cualquier proceso aplicado a una imagen antes de reducir el speckle, genera un ruido que se incorpora a la propia imagen, produciendo una degradación de la misma. El speckle no puede ser nunca eliminado totalmente, pero sí reducido significativamente. Por ello, los **filtros multitemporales** tienen como objetivo dicha reducción, procurando conservar las características espaciales y las estructuras lineales de la escena (García et al., 2003).

La elección del filtro depende del tipo de imagen. En el caso de las cubiertas vegetales los filtros Lee-Sigma y Gamma-map han dado buenos resultados en los estudios previos (García et al., 2003)

## **4.3. Diseño experimental**

Los datos de campo como ya se ha comentado se recogieron de las 9 parcelas localizadas en los Municipios de Egües, Lizoáin y Lónguida durante el año 2012. Una vez recogidos los datos medidos en una serie de 14 días (Figura 22) a lo largo del ciclo de los cultivos, se dividen en dos series que se trabaja independientemente: una serie con las parcelas de cebada (2 variedades) y otra serie con las parcelas de trigo.



**Figura 22. Calendario de toma de datos**

En las mismas fechas se obtienen 9 imágenes del satélite TerraSAR-X. Después de procesar las imágenes se calculan los datos medios del  $\sigma^0$  por parcela en las polarizaciones VV, VH y el ratio VH/VV. Estos datos son los que se correlacionan con las variables medidas en campo.

El análisis de los resultados se ha llevado a cabo relacionando directamente los valores del coeficiente de retrodispersión ( $\sigma^0$ ) en las polarizaciones VV y VH y su ratio (VH/VV) con las medidas tomadas en campo para las parcelas de trigo y cebada.

## 5. Resultados y discusión

### 5.1. Datos de campo

En la siguiente Figura (23) se puede ver la fenología según la escala de Zadoks. Se observa que tanto en el caso del trigo como en el de la cebada la curva es ascendente, algunas parcelas incluso se solapan unas a otras. El solapamiento muestra la homogeneidad en el ritmo de crecimiento que están llevando las distintas variedades entre sí. Cabe destacar que la cebada a partir de Z. 30 (encañado) se desarrolla más rápido que el trigo.

La parcela 5 con la variedad de cebada Meseta se retrasa un poco en el encañado. Probablemente sea un problema de la parcela (tipo de suelo) o del manejo del cultivo ya que las otras parcelas (2, 3 y 8) que también están sembradas con Meseta no presentan este retraso. En el caso del trigo la variedad Berdún (P 9) se desarrolla más rápidamente a partir del encañado, igualándose con las demás en la formación del fruto (Z70).

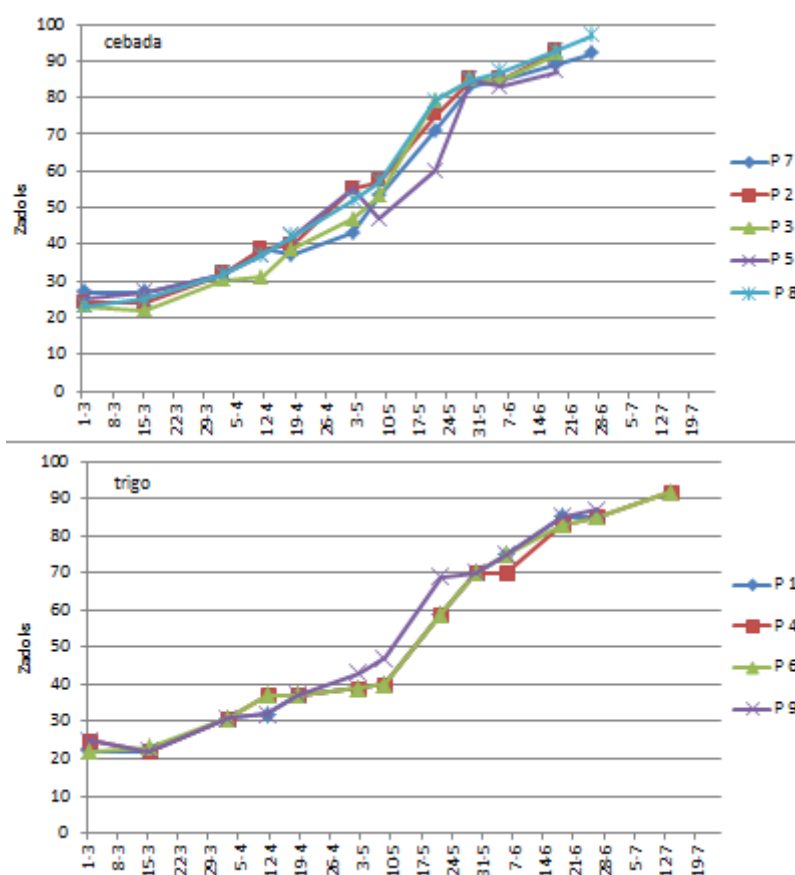
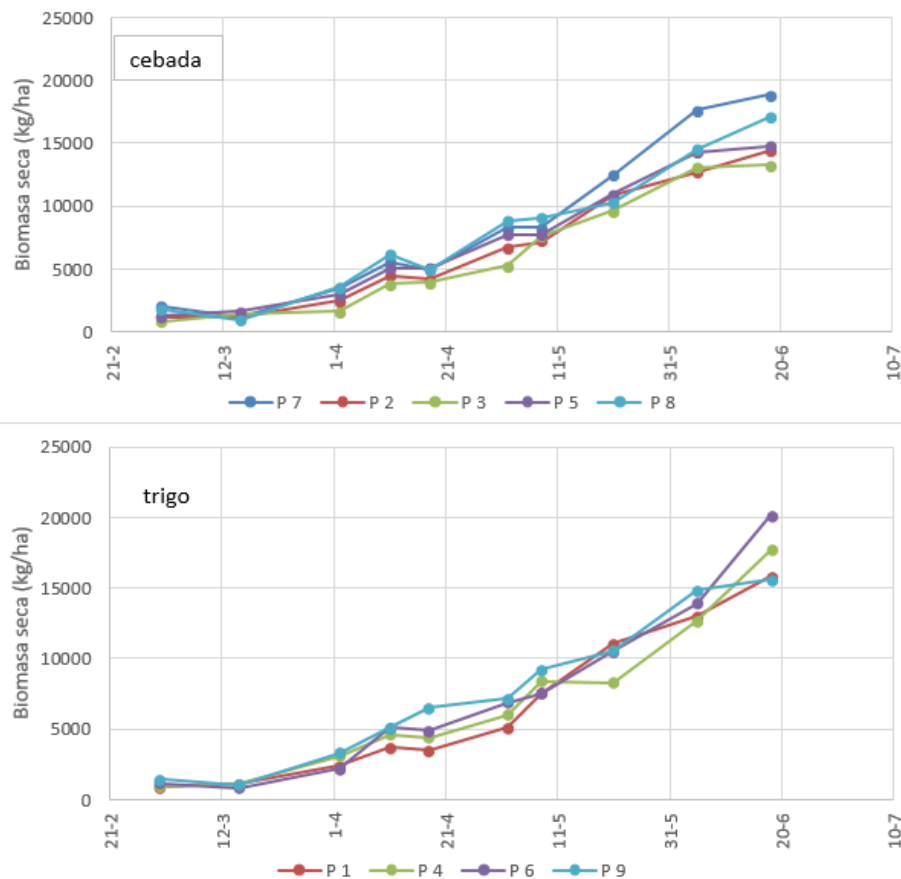


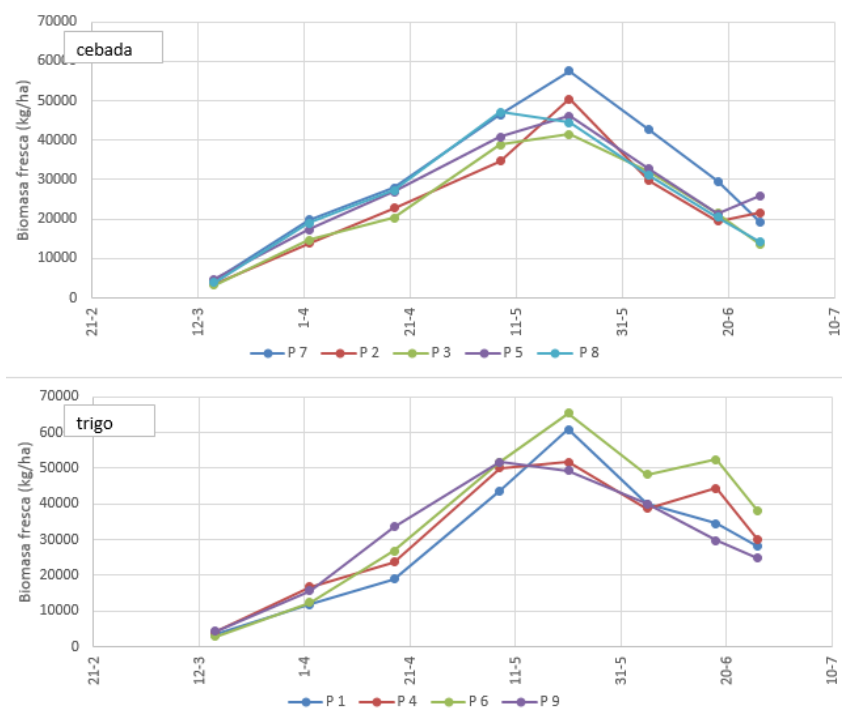
Figura 23. Evolución del estado fisiológico según Zadoks a lo largo del ciclo del cultivo

La biomasa seca (Figura 24) aumenta a lo largo de todo el ciclo de cultivo. Se puede ver que se rompe esta tendencia el 18 de abril produciéndose un descenso en la cantidad. Esto se puede deber a un error de tipo experimental ya que no es muy probable que en esa fecha el cultivo pierda agua.



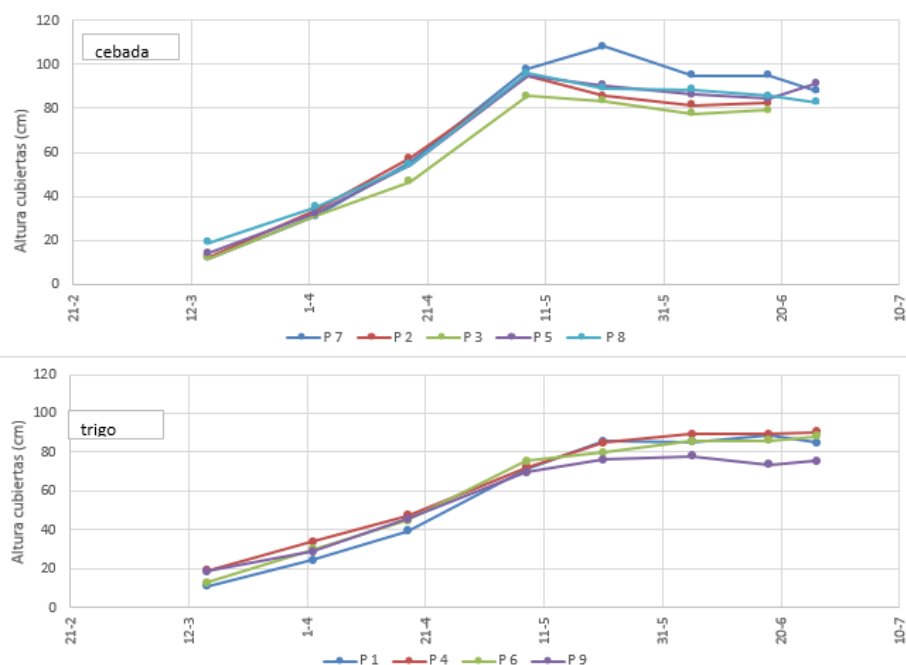
**Figura 24. Evolución de la biomasa seca a lo largo del ciclo del cultivo**

La biomasa fresca (Figura 25) aumenta con el desarrollo del cultivo en ambos casos hasta mediados de mayo que comienza el espigado, a partir de este momento comienza a disminuir. La capacidad de producción de biomasa del trigo es superior a la de la cebada en todas las parcelas. Dentro de los trigos la variedad Camargo es la que más biomasa es capaz de generar llegando hasta los 20124 kg/ha. En la cebada destaca la Parcela 7 con una producción bastante superior al resto de parcelas (18860 kg/ha), sobre todo si se compara con la Parcela 3 que no llega a 15000 kg/ha.



**Figura 25. Evolución de la biomasa húmeda a lo largo del ciclo del cultivo**

La altura de la cubierta (Figura 26) aumenta para los dos cultivos hasta el espigado y después se produce el encamado. Este fenómeno es más acusado en la cebada ya que por su morfología es una planta con un tallo más fino que el del trigo.



**Figura 26. Evolución de la altura de las cubiertas a lo largo del ciclo del cultivo**



## 5.2. Correlaciones $\sigma^0$ -datos campo

Tras haber realizado los gráficos, para cada parcela y variable de estudio se ha calculado la **regresión lineal**. En las Tablas 10 y 11 se puede ver un resumen del valor de  $R^2$  para cada gráfico.

**Tabla 10. Resultados  $R^2$  para el trigo**

	TRIGO						
	Estado fenológico	Biomasa seca	Biomasa húmeda	Humedad cubierta	Altura cubiertas	Índice de biomasa	Humedad del suelo
	Zadoks	kg/ha	kg/ha	kg/ha	cm	plantas*m/m <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
<b>VV</b>	0,1256	0,0034	0,2623	0,1506	0,3922	0,4657	0,0829
<b>VH</b>	0,2218	0,0014	0,211	0,0015	0,1133	0,3707	0,0014
<b>RATIO</b>	0,0424	0,021	0,2381	0,1231	0,3037	0,4267	0,199

**Tabla 11. Resultados  $R^2$  para la cebada**

	CEBADA						
	Estado fenológico	Biomasa seca	Biomasa húmeda	Humedad cubierta	Altura cubiertas	Índice de biomasa	Humedad del suelo
	Zadoks	kg/ha	kg/ha	kg/ha	cm	plantas*m/m <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
<b>VV</b>	0,0316	0,0707	0,0408	0,024	0,0057	0,0057	0,1329
<b>VH</b>	0,4665	0,095	0,0948	0,0794	0,1268	0,0031	0,018
<b>RATIO</b>	0,2127	0,1072	0,0006	0,2118	0,0729	0,0926	0,3029

Los valores obtenidos de  $R^2$  indican una alta variabilidad para todos los casos, por lo que no es fiable utilizarlo para valorar las dependencias. Los valores de  $R^2$  del trigo para la altura de la cubierta y el índice de biomasa muestran un mejor ajuste que para el resto de variables. Lo que sí que se saca en claro es que las tendencias observadas siguen patrones más complejos que no se ajustan a una regresión lineal. Si se realiza una comparación entre la  $R^2$  del trigo y la cebada se observan resultados diferentes. Por ejemplo, en el caso de la altura de la cubierta o el índice de biomasa el trigo se ajusta mucho mejor que la cebada, en el ratio el trigo alcanza un valor de 0,3037 frente a un 0,0729 de la cebada. A continuación se muestran los patrones observados para cada caso de estudio de un modo cualitativo.

### 5.3. Sensibilidad de la cubierta vegetal

El patrón (Figura 27) que se observa en VV tanto para el trigo como para la cebada muestra una tendencia descendente (hasta el estado Z.40 aproximadamente) que luego cambia y se convierte en ascendente. En el caso de VH se observa un patrón más bien plano, por lo que el ratio VH/VV muestra una tendencia inversa al  $\sigma_{VV}^0$  (es decir, primero ascendente y luego descendente). Tanto la señal mínima alcanzada en VV como la máxima en el ratio coinciden para los dos cultivos con el estado fenológico 40, según Zadoks, siendo el momento en que la vaina empieza a engrosar (hoja bandera).

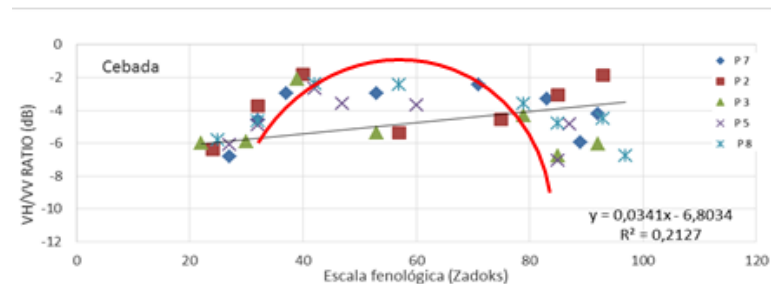
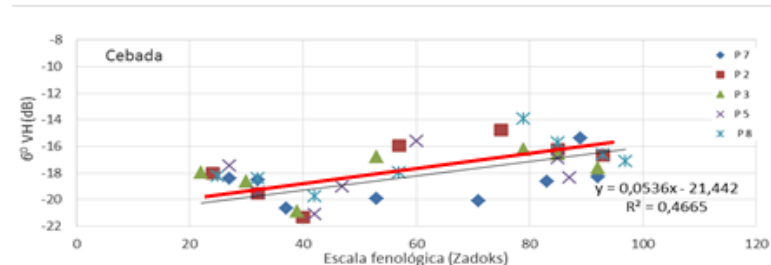
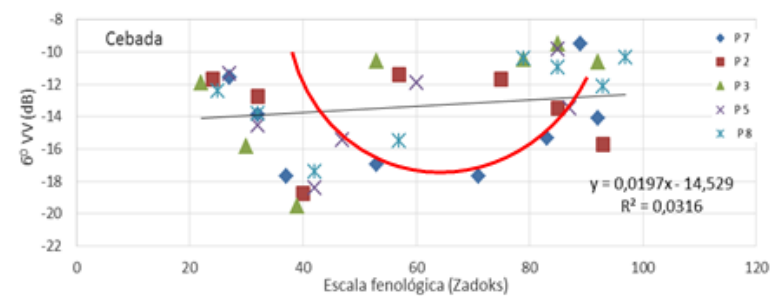
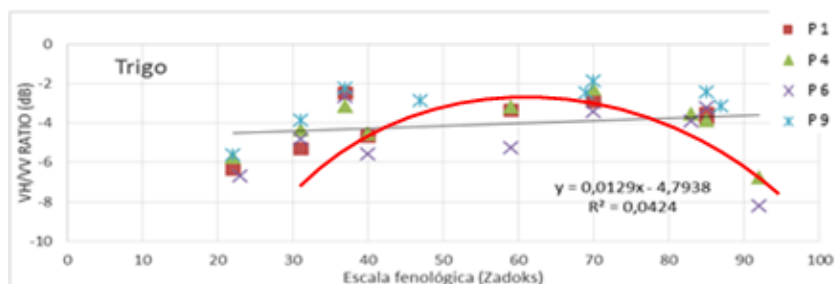
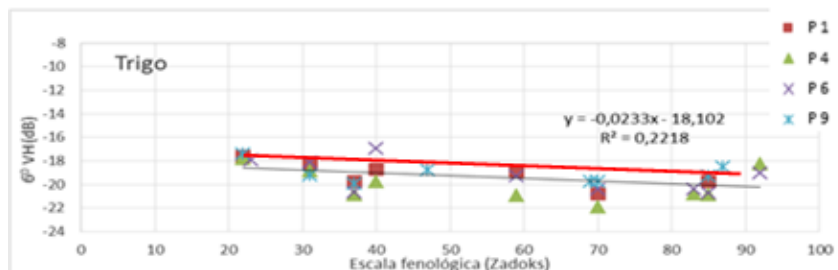
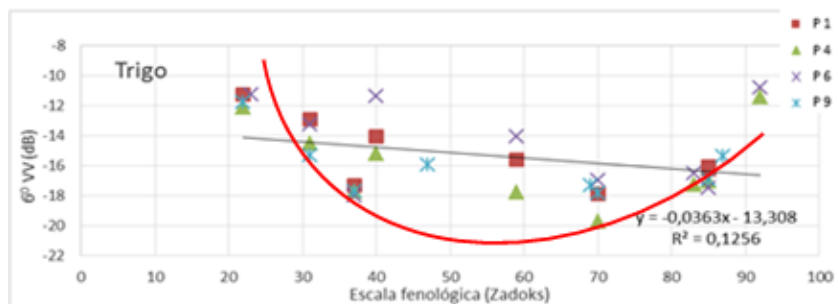

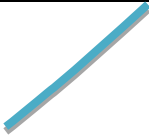






Figura 27. Comparación y tendencia (línea roja) del Coeficiente de retrodispersión con la Escala fenológica (Zadoks) para las distintas polarizaciones de las parcelas de trigo y cebada

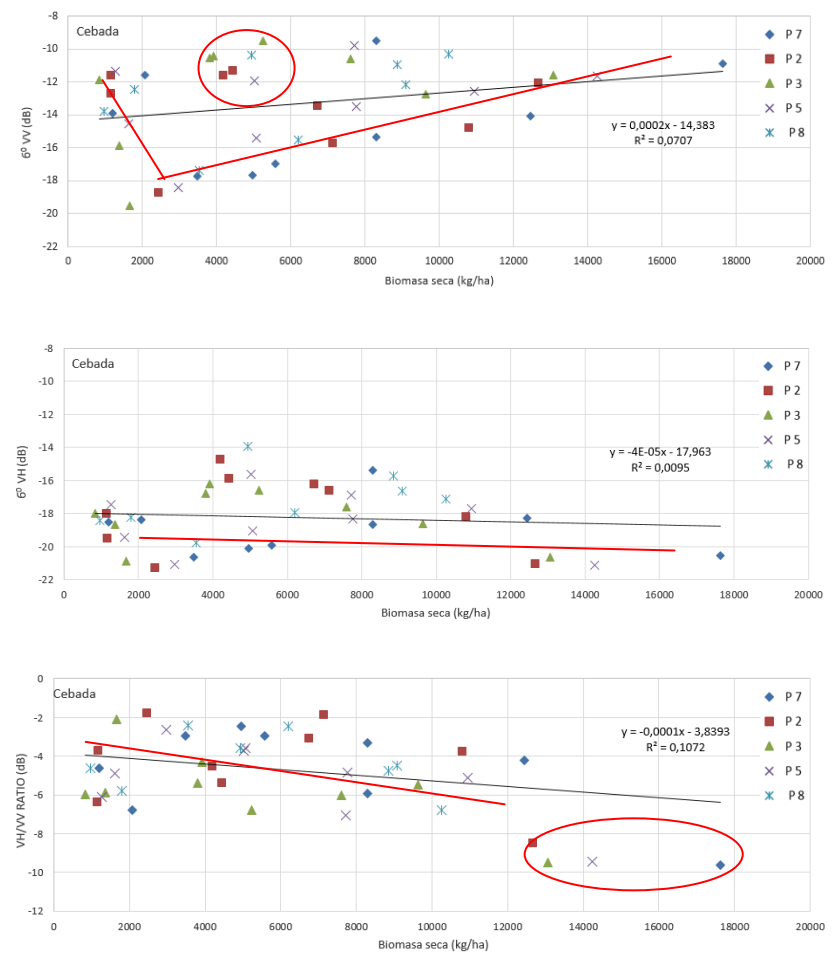
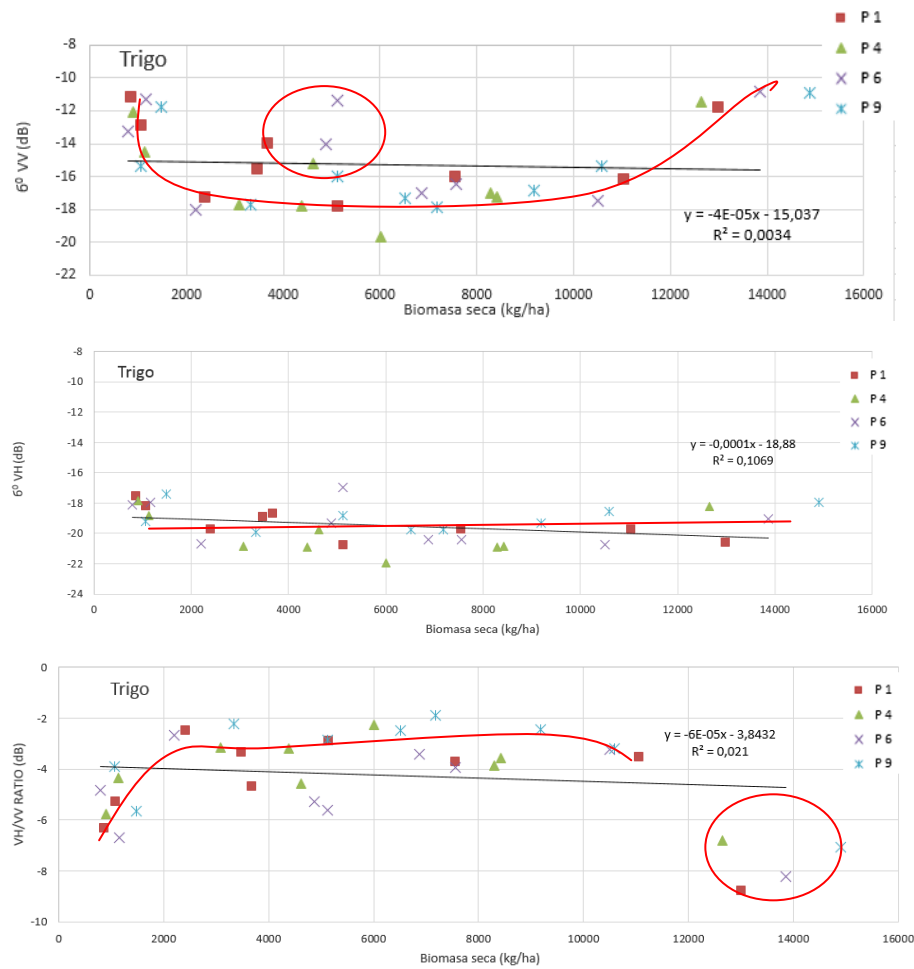
A continuación se puede ver en la Tabla (12) un resumen con las tendencias seguidas por los cultivos según el Estado fenológico (Zadoks).

**Tabla 12. Patrón Estados fenológicos**

EST. FENOLÓGICOS	VV	VH	RATIO
TRIGO			
CEBADA			

En el caso de la **biomasa seca** (Figura 28) se observan correlaciones menores. Esto puede deberse a que son las características geométricas y dieléctricas las que influyen en la retrodispersión. Siendo las características dieléctricas dependientes del contenido de humedad de la cubierta y no tanto de su biomasa seca.

En el caso del trigo cuando la polarización es VV sigue la tendencia de disminución de la señal hasta que alcanza un máximo de biomasa el 5 de junio y se distorsiona probablemente porque a partir de ese momento la cubierta tiende a secarse, lo que hace que aumente VV. Para la cebada en VV se aprecia una tendencia lineal muy descendiente que luego asciende paulatinamente. Aunque este patrón se ve alterado por valores altos de  $\sigma_{VV}^0$  en Z40 coincidiendo con el encañado. VH no se muestra como una polarización indicada para el control de la biomasa seca porque no parece tener sensibilidad alguna. El ratio asciende rápidamente hasta los 4000 kg/ha en el trigo y después comienza a saturarse. Una vez se alcanzan valores altos de biomasa (12000 kg/ha) esta tendencia se rompe porque probablemente la cubierta esté seca.



**Figura 28. Comparación y tendencia (línea roja) del Coeficiente de retrodispersión con la Biomasa seca para las distintas polarizaciones de las parcelas de trigo y cebada**

En la siguiente Figura (29) se pueden ver las gráficas que correlacionan la biomasa fresca con la señal de retorno,  $\sigma^0$ . El trigo muestra una clara tendencia descendente en VV hasta que se alcanzan los 30000 kg/ha donde comienza la saturación y la aleatoriedad de la señal aumenta. La cebada, con un nivel de variabilidad mayor, muestra la misma tendencia descecente hasta los 30000 kg/ha y a partir de ahí se puede ver que predomina la tendencia de la espiga. En la polarización cruzada la tendencia para el trigo también es descendente y luego ascendente aunque con menor pendiente. En la cebada tanto en VH como en el ratio los valores del 18 de Abril se diferencian del resto. El ratio del trigo muestra un patrón claramente ascendente con tendencia a la saturación a partir de 30000 kg/ha.

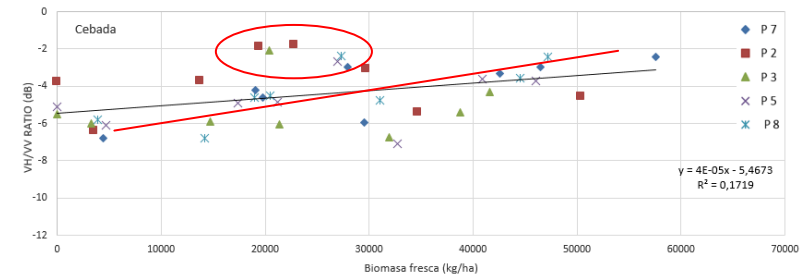
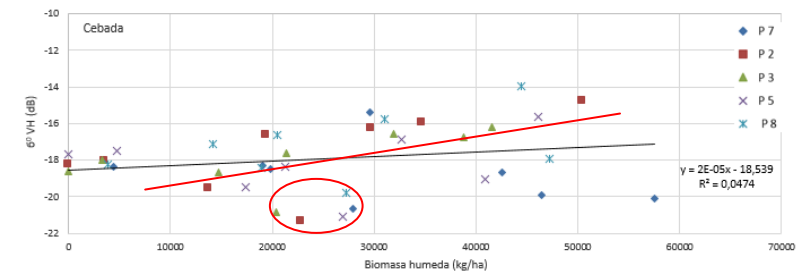
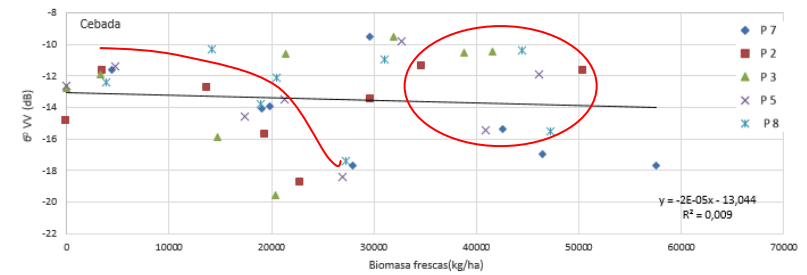
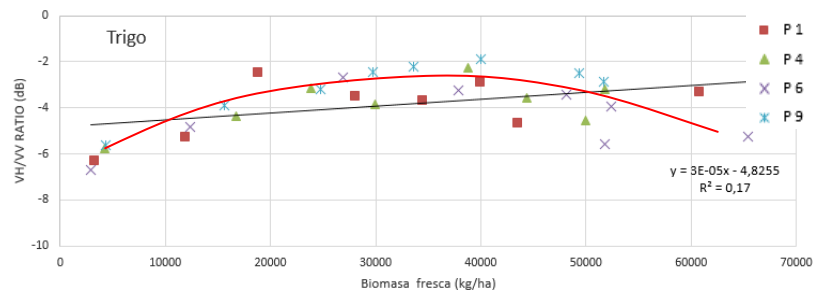
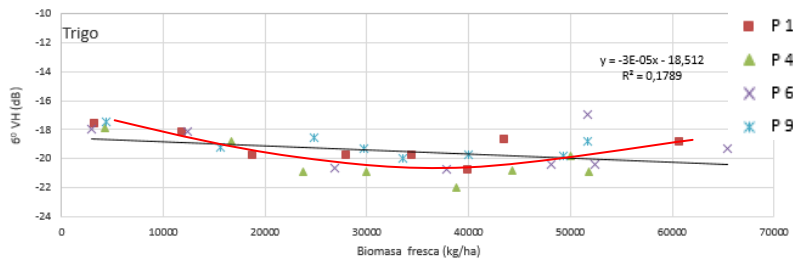
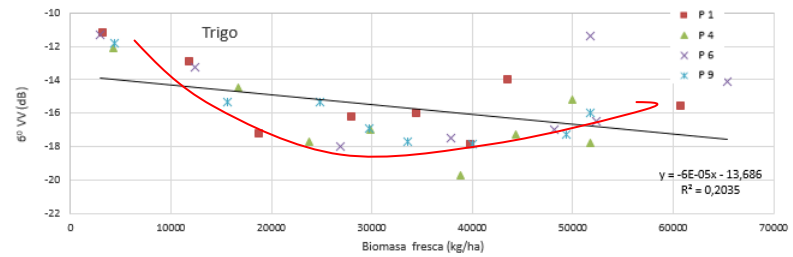
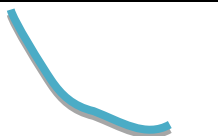

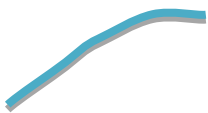
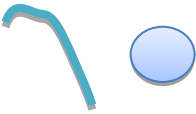









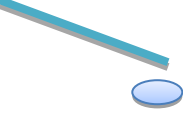
Figura 29. Comparación y tendencia (línea roja) del Coeficiente de retrodispersión con la Biomasa fresca para las distintas polarizaciones de las parcelas de trigo y cebada

En las siguientes Tablas 13 y 14 se pueden ver los patrones resúmenes vistos para la biomasa húmeda y fresca.

**Tabla 13. Patrón biomasa fresca**

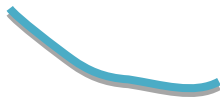

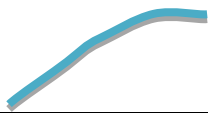


BIOMASA FRESCA	VV	VH	RATIO
TRIGO			
CEBADA			

**Tabla 14. Patrón biomasa seca**

BIOMASA SECA	VV	VH	RATIO
TRIGO			
CEBADA			

Restando a la biomasa húmeda la biomasa seca se obtiene los kg de H<sub>2</sub>O por hectárea, este valor puede ser interesante para ver la influencia de la **humedad de la cubierta** (características dieléctricas) (Tabla 15).

**Tabla 15. Patrón Humedad cubierta**

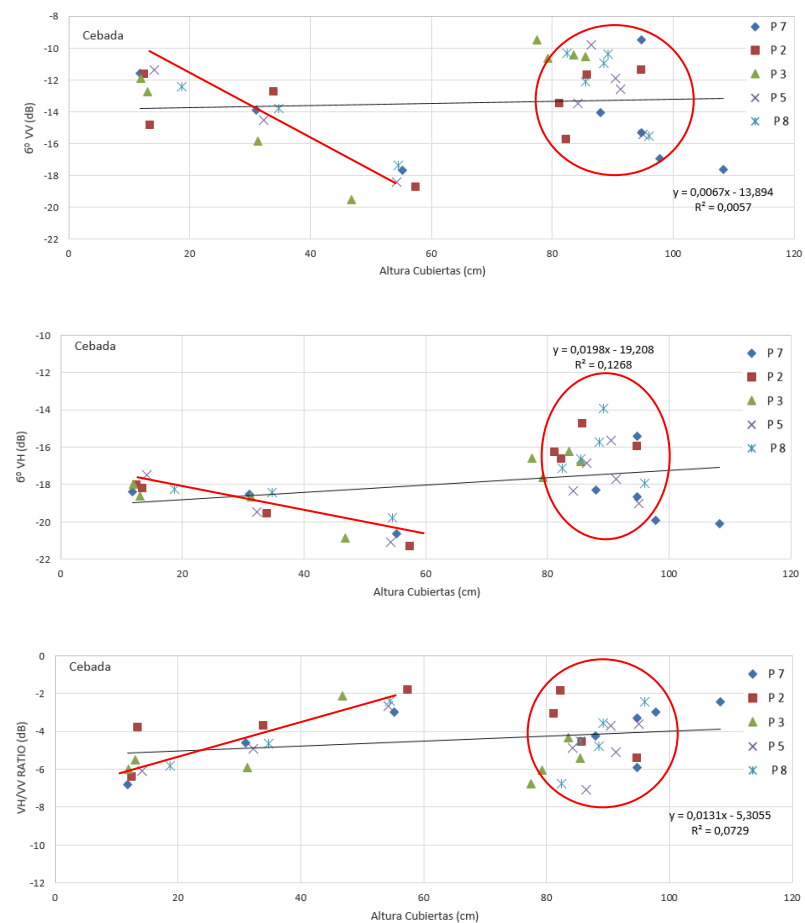
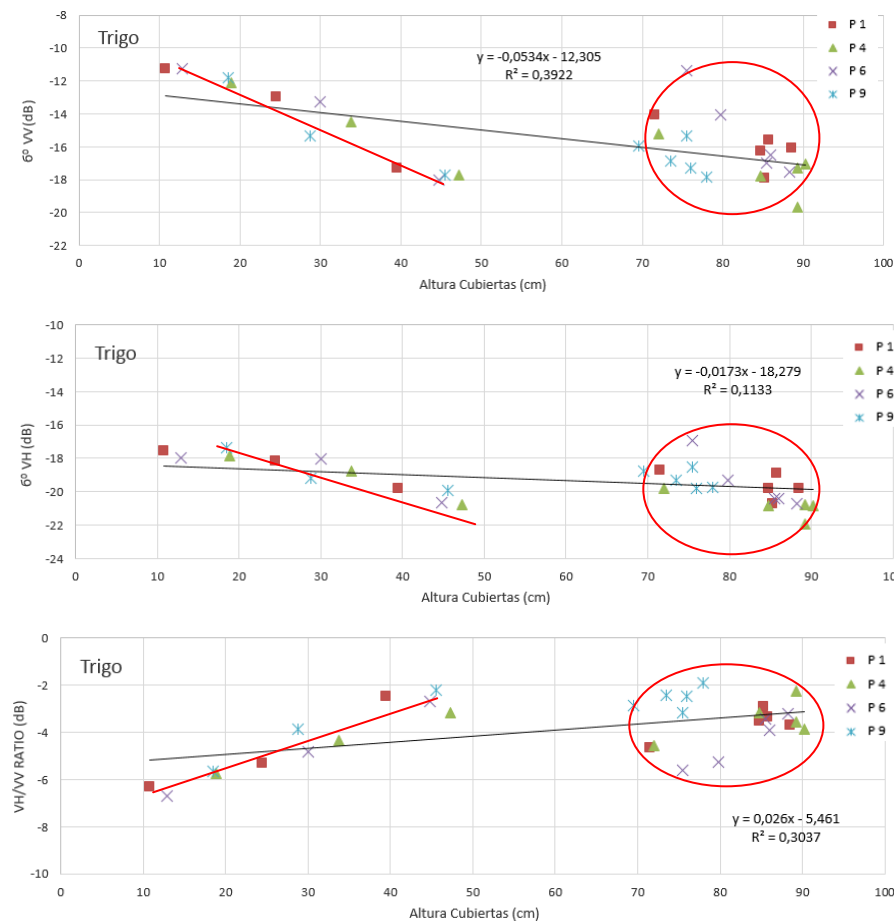
HUMEDAD CUBIERTA	VV	VH	RATIO
TRIGO			
CEBADA	dispersión		

En el caso del trigo en la polarización VV se ve una clara tendencia descendente, reflejando al máximo el día 18 de mayo donde casi se alcanza el máximo de biomasa húmeda. El ratio aumenta hasta alcanzar un máximo que coincide con el inicio del espigado y desde ese punto



disminuye ligeramente. VH no parece en ningún caso ser un buen indicador del agua que contiene el cultivo. En la cebada la dispersión es mayor y no se aprecia ningún patrón claro.

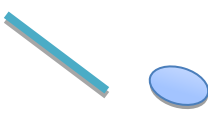

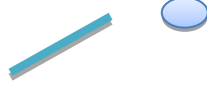



En la siguiente figura se caracteriza el patrón para la **Altura de la cubierta**. Tanto para el trigo como para la cebada los patrones coinciden en los tres casos (Figura 30). Se aprecia una clara tendencia descendente en VV hasta los 50-60 cm. A partir de los 70-80 cm se rompe esta relación y los valores de  $\sigma^0$  aumentan, probablemente por la influencia de la espiga. En VH se observa algo similar pero con una tendencia menos marcada, lo que hace que el ratio VH/VV tenga una relación ascendente clara con la altura del cultivo hasta los 50-60cm, a partir de ese valor ya no se observa sensibilidad alguna dado que lo que influye es la espiga.



**Figura 30. Comparación y tendencia (línea roja) del Coeficiente de retrodispersión con la Altura de la cubierta para las distintas polarizaciones de las parcelas de trigo y cebada**

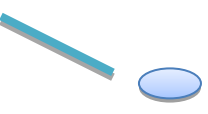
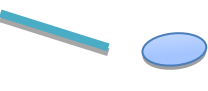
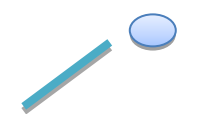


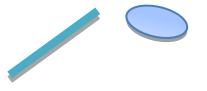
En la siguiente tabla (16) se recoge un resumen de los patrones seguidos por la altura de la cubierta.

**Tabla 16. Patrón Altura cubierta**

ALTURA CUBIERTA	VV	VH	RATIO
TRIGO			
CEBADA			

En la siguiente tabla (17) se puede ver el patrón del Índice de biomasa.

**Tabla 17. Patrón Índice de biomasa**

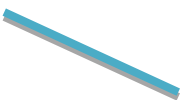





ÍNDICE DE BIOMASA	VV	VH	RATIO
TRIGO			
CEBADA			

Para el trigo y la cebada se sigue el mismo patrón para los tres casos. En VV un patrón descendente hasta que se satura debido al aumento del índice de biomasa. En VH se ve el mismo patrón descendente pero menos acusado. Y en el ratio ocurre lo mismo pero con un patrón ascendente. Individualmente en el trigo las parcelas 6 y 1 y en la cebada la parcela 3 se ve claramente una menor densidad de vegetación.

## 5.4. Sensibilidad del suelo

En la siguiente tabla (18) se presenta el patrón visto para la humedad del suelo.

**Tabla 18. Patrón humedad del suelo**

HUMEDAD DEL SUELO	VV	VH	RATIO
TRIGO			
CEBADA			

Para el trigo, en el ratio y en VV, los valores donde  $\sigma^0$  es más elevado coinciden con los datos de humedad máximos correspondientes al mes de mayo. El mes de mayo coincide con el momento del espigado y el poco poder de penetración de la banda X hace pensar que la señal recibida proviene de la humedad de la cubierta.

En el caso de la cebada para los tres casos de estudio se distinguen dos grupos claramente diferenciados, coincidiendo los valores más altos de la señal con el mes de mayo y los más bajos con el mes de junio. Coincidiendo con el encañado tanto en VV como en VH se diferencia un máximo y un mínimo (18 abril), este fenómeno puede tener su causa en una lluvia caída el día anterior.

## 5.5. Discusión conjunta

La caracterización de la vegetación utilizando la banda X presenta ciertas limitaciones (Ulaby, Moore, & Fung, 1982) ya, que esta banda, penetra sólo en la superficie de la cubierta relacionando el coeficiente de retrodispersión con los elementos más superficiales de la vegetación. Fontanelli et al. (2013) observaron que en la banda-X debido a la similitud en la geometría y en la dimensión de los dos cultivos (trigo y cebada) la diferenciación de ambos se complicaba. En el presente estudio sobre todo a través de la biomasa fresca y la humedad de la cubierta se han obtenido unos patrones diferenciados que pueden ser interesantes para poder llegar a diferenciar ambos cultivos. Sí, que se confirma la poca sensibilidad de la biomasa seca al  $\sigma^0$  en la banda-X tal y como se había visto en otros estudios debido a la influencia de las características dieléctricas de la cubierta (Fontanelli et al., 2013).

La relación entre el radar y las medidas biofísicas están claramente influenciadas por la estructura de la cubierta que depende del estado fenológico del cultivo (Mattia et al., 2003). Al igual que Mattia et al (2003) a pesar de haber trabajado en la banda-X los resultados obtenidos muestran importantes diferencias entre la sensibilidad en la retrodispersión antes y después del espigado, en este caso sobre todo para la biomasa fresca y la humedad y altura de la cubierta. También se ha observado una clara influencia en el momento de emergencia de la hoja bandera (Z 40) tanto en la biomasa seca como en el estado fenológico. Los valores anómalos que se han obtenido para la biomasa húmeda que corresponden al día 18 de abril se pueden deber al rocío debido a lluvias caídas el día anterior o al estado fenológico que coinciden con la emergencia de la hoja bandera.

Según (Moran et al., 2012) la combinación de información de HV y VV-HH en la banda-C, teniendo una serie temporal de datos grande, aporta la mejor oportunidad para ver el crecimiento de los cultivos y el estado fenológico. Por los resultados obtenidos en este estudio, en la banda-X, la correlación de las variables con VH es débil. Resultado que coincide con otros estudios realizados anteriormente en la banda-C donde también se observó una tendencia inexistente para la polarización VH vista sobre todo en el trigo (Larranaga et al., 2013). En la banda VV los resultados obtenidos muestran una leve atenuación aunque en menor medida de lo que apunta Mattia et al. (2003) debido a la estructura vertical de los cereales que es fina y densa (tallos). Es por ello, por lo que la atenuación es un poco mayor en la cebada ya que su estructura es más débil que la del trigo.

Estudios realizados en la banda C demuestran que la polarización HV es la mejor para obtener diferencias entre zonas de alta y baja productividad, estos resultados no coinciden con los observados en este trabajo. La señal del radar tiende a crecer rápido con la biomasa hasta un determinado punto, que depende del tipo de cultivo, polarización y el ángulo de incidencia, donde la señal se detiene y crece ligeramente, es decir, llega a un punto en el que se satura (Baghdadi, Boyer, Todoroff, El Hajj, & Bégué, 2009). Para la banda X en este estudio la polarización que más información nos da sobre la biomasa fresca no es VH sino VV, con un ángulo de incidencia de  $40^{\circ}$ , aunque sí se confirma la tendencia a la saturación a partir de una determinada cantidad de biomasa (30000 kg/ha). Otros estudios realizados en la banda C también confirman que la polarización VV con un ángulo de incidencia de  $23^{\circ}$  y antes del espigado es sensible a la biomasa a través de la atenuación de las señales del suelo, aunque después del espigado ninguna medida individual aporta información alguna sobre la biomasa pero sí sobre la humedad del suelo (Mattia et al., 2003).

La humedad del suelo no ha influido en los resultados obtenidos como se ha podido ver en los gráficos al igual que en el estudio de Fontanelli et al. (2013) para la banda-X. En cambio estudios realizados en la banda C, con una cobertura media de vegetación, sí que reflejan la influencia de la humedad del suelo en los resultados. Las polarizaciones más sensibles a la humedad del suelo se han demostrado que son VV y VH (Moran et al., 2012).

Los mejores resultados que se han obtenido en este proyecto han sido las correlaciones con la altura de la cubierta y el índice de vegetación, no se descarta que sea debido a la menor influencia en ambos casos del error experimental. La regresión lineal ( $R^2$ ) que mostraba altas variabilidades para todos los objetos de estudio ya dejaba ver una mejor relación con estas dos variables, sobre todo en el caso del trigo.

## 6. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. El típico comportamiento de atenuación que se observa en las cubiertas vegetales para la polarización VV se aprecia en la banda-x pero en menor medida que en la banda-C. Este comportamiento se debe a la morfología de los cultivos. Esta puede ser la causa por la que el trigo ha obtenido, en general, mejores relaciones para todos los parámetros. El trigo que normalmente mantiene la espiga (la planta en general) más recta hasta la cosecha obtiene mejores relaciones con el  $\sigma^0$  que la cebada que es más débil y tiende a tumbarse la espiga. Para la polarización VH no se han obtenido buenas correlaciones para ninguna variable.
2. Se observan mejores relaciones de  $\sigma^0$  con la biomasa fresca que con la seca debido a las características dieléctricas de la cubierta. A pesar de ello, para la biomasa fresca a partir de 30000 kg/ha el  $\sigma^0$  comienza a saturarse, en el caso de VV y ratio para el trigo y en el caso de VV para la cebada.
3. La relación más clara en ambos cultivos se ha observado a través de la altura de la cubierta o el índice de biomasa, esto se puede deber a que el error experimental en ambos casos es menor. Aunque los resultados sean buenos las dos variables se saturan en un momento determinado. En el caso de la altura de la cubierta la saturación empieza cuando los cultivos alcanzan una altura de 70-80 cm debido probablemente al espigado y en el caso del índice de biomasa la saturación comienza a partir de las 60-80 plantas\* m/m<sup>2</sup>.
4. La emergencia de la espiga influye claramente en ambos cultivos en las siguientes variables: biomasa fresca y humedad y altura de la cubierta. En cambio la hoja bandera influye en la correlación de  $\sigma^0$  con el estado fenológico y en el caso de la cebada también con la biomasa seca. No se ve una clara influencia de la humedad del suelo en las demás variables debido al poco poder de penetración de la banda-X.

## 7. Bibliografía

### References

- AIRBUS defence and space. (2014). *Radiometric calibration of TerraSAR-X data. beta naught and sigma naught coefficient calculation.*
- Baghdadi, N., Boyer, N., Todoroff, P., El Hajj, M., & Bégué, A. (2009). Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on reunion island. *Remote Sensing of Environment*, 113(8), 1724-1738.
- Bellido, L. L. (1990). *Cultivos herbaceos Voll–Cereales*
- Bellido, L. L. (2012). *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en españa. parte II. abonado de los principales cultivos en españa.*
- Broge, N. H., & Leblanc, E. (2001). Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76(2), 156-172.
- Brown, S., Quegan, S., Morrison, K., Bennett, J. C., & Cookmartin, G. (2003). High-resolution measurements of scattering in wheat canopies-implications for crop parameter retrieval. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions On*, 41(7), 1602-1610.
- Casal, G., & Freire, J. (2012). Síntesis de la evolución histórica de la teledetección en españa (1889-2012). *Revista De Teledetección AET*, 38, 109-120.
- Chen, J., Gu, S., Shen, M., Tang, Y., & Matsushita, B. (2009). Estimating aboveground biomass of grassland having a high canopy cover: An exploratory analysis of in situ hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(24), 6497-6517.



Chuvieco Salinero, E. (1990). In Madrid: Rialp D. L. 1. (Ed.), *Fundamentos de teledetección espacial*. España:

Chuvieco Salinero, E. (2002). In Barcelona: Ariel 2. (Ed.), *Teledetección ambiental. la observación de la tierra desde el espacio*. España:

Elachi, C., Kuga, Y., McDonald, K., Sarabandi, K., Ulaby, F., Whitt, M., . . . van Zyl, J. (1990). Radar polarimetry for geoscience applications.

ESA. (1995). *Satellite radar in agriculture. experience with ERS-1*. The Netherlands: Tan-Duc Guyenne.

ESA edu SPACE. (2015). Historia de la observación terrestre. Retrieved from [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_ES/SEMZQYD3GXF\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMZQYD3GXF_0.html)

FAO. (2015). Perspectiva de cosechas y situación alimentaria.(Marzo)

Fontanelli, G., Paloscia, S., Zribi, M., & Chahbi, A. (2013). Sensitivity analysis of X-band SAR to wheat and barley leaf area index in the merguellil basin. *Remote Sensing Letters*, 4(11), 1107-1116.

García Fernández, J. (1971). *Cultivos herbáceos* Agrociencia.

Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista De Teledetección*, 8(10)

Gitelson, A. A. (2004). Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161(2), 165-173.

- Gobierno de Navarra. (2015). In Departamento de desarrollo rural Medio Ambiente y Administración Local (Ed.), *Principales producciones agrícolas navarra*. Navarra:
- Goñi, J., Segura, A., Arnal, A. L., & Armesto, A. P. (2008). NUEVAS VARIEDADES DE CEREAL RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN ITG AGRÍCOLA CAMPAÑA 2007/2008.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
- International Grains Council. (2014). Five-year global supply and demand projections.(December)
- itg Agrícola. (2008). Orientaciones para la siembra de otoño. campaña 2008/2009.1
- Larranaga, A., Alvarez-Mozos, J., Albizua, L., & Peters, J. (2013). Backscattering behavior of rain-fed crops along the growing season. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 10(2), 386-390.
- M. Henderson, F., & J. Lewis, A. (1998). In A. Ryerson R. (Ed.), *Principles and applications of imaging radar* (3rd ed.). Unites States of America: John Wiley and sons.
- M. Lillesand, T., W. Kiefer, R., & W. Chipman, J. (2008). *REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION* (6th ed.). Unites States of America: John Wiley and sons.
- Maluenda García, M. J. (2014). Proyecciones en el sector de cebada campaña 2014/2015.
- Marchionni, D. S., & Cavayas, F. (2014). La teledetección por radar como fuente de información litológica y estructural: Análisis espacial de imágenes SAR de RADARSAT-1. *Geoacta*, 39(1), 62-89.

- Mattia, F., Le Toan, T., Picard, G., Posa, F., D'Alessio, A., Notarnicola, C., . . . Pasquariello, G. (2003). Multitemporal C-band radar measurements on wheat fields. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions On*, 41(7), 1551-1560.
- McNairn, H., & Brisco, B. (2004). The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3), 525-542.
- Meier, U. (2001). *Estadios de las plantas mono-dicotyledóneas* (2nd ed.) Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura.
- Moran, M. S., Alonso, L., Moreno, J. F., Mateo, M. P. C., la Cruz, D., Fernando, D., & Montoro, A. (2012). A RADARSAT-2 quad-polarized time series for monitoring crop and soil conditions in barrax, spain. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions On*, 50(4), 1057-1070.
- Myneni, R., & Williams, D. (1994). On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 49(3), 200-211.
- NASA. (2013). Landsat 8, overview. Retrieved from [http://landsat.gsfc.nasa.gov/?page\\_id=7195](http://landsat.gsfc.nasa.gov/?page_id=7195)
- Prabhakara, K., Hively, W. D., & McCarty, G. W. (2015). Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in maryland, united states. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 88-102.

- Purevdorj, T., Tateishi, R., Ishiyama, T., & Honda, Y. (1998). Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 19(18), 3519-3535.
- Rawson, H. M., & Macpherson, H. G. (2001). *Trigo regado: Manejo del cultivo* Food & Agriculture Org.
- REGADIOX. (2015). INTIA presentó: "El impacto del canal de navarra en el sector agroalimentario navarro" durante las jornadas agrarias horizonte 2020. Retrieved from <http://life-regadiox.es/intia-presento-el-impacto-del-canal-de-navarra-en-el-sector-agroalimentario-navarro-durante-las-jornadas-agrarias-horizonte-2020-2/>
- Riegos de Navarra. (2015). Estudio de impacto ambiental del canal de navarra y la transformación de sus zonas regables. Retrieved from <http://www.riegosdenavarra.com/itoiz/texto.htm>
- Scan Terra. (2015). Retrieved from [http://www.scanterra.com.ar/conozca\\_mas.html](http://www.scanterra.com.ar/conozca_mas.html)
- Segura, A., Arnal, A. L., & Goñi, J. (2013). Técnicas de cultivo en cereales. claves para obtener buenos rendimientos. *Navarra Agraria*,
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1982). Microwave remote sensing active and passive- volume II: Radar remote sensing and surface scattering and enission theory.3
- Vicente, A., Donézar, M., del Barrio, F., & San Roque, M. (2004). Memoria del mapa de cultivos y aprovechamientos de navarra. escala 1: 200.000.

# ANEXOS

## 8. ANEXOS

### ANEXO 1: INFORMACIÓN PARCELAS

#### PARCELA 1. SIMES

Propietario: S. C. Orbaiz Galar, José María y Valentín

Cultivo (Especie y variedad): Trigo blando, Bokaro.

	Municipio	Cód .	Pol.	Parcela	Uso 2013	Tipo riego	Sup. Catastral (Ha)	Pendiente (%)
1	Egües	86	8	122	Tierra arable	Secano	2,85	2,4



Figura 31. Parcela 1.

## **PARCELA 2. DEBAJO CASA**

Propietario: S. C. Cabodevilla Lizarraga, Felisa.

Cultivo (Especie y variedad): Cebada, Meseta.

	Municipio	Cód .	Pol.	Parcela	Uso 2013	Tipo riego	Sup. Catastral (Ha)	Pendiente (%)
2	Lizoáin	156	1	111	Tierra arable	Secano	6,69	12,9



Figura 32. Parcela 2.

### **PARCELA 3. FUENTE FRAILE**

Propietario: S. C. Cabodevilla Lizarraga, Felisa.

Cultivo (Especie y variedad): Cebada, Meseta.

	Municip	Cód.	Pol.	Parc.	Subpar.	Uso 2013	Tipo riego	Sup. Catastral (Ha)	Pendiente (%)
3	Egües	86	4	7	4	Tierra arable	Secano	3,01	6,4



Figura 33. Parcela 3.



#### **PARCELA 4. EL PARRAL**

Propietario: Goñi Esquiroz, David.

Cultivo (Especie y variedad): Trigo blando, García.

	Municip	Cód	Pol.	Parc.	Subp ar.	Uso 2013	Tipo riego	Sup. Catastral (Ha)	Pendiente (%)
4	Egües	86	5	30	1	Tierra arable	Secano	5,68	12,4
					2	Pasto con arbolado	Secano	0,21	24,30



**Figura 34. Parcela 4**

### **PARCELA 5. CAMPO DE YELZ**

Propietario: Garde Agudo, José Luis.

Cultivo (Especie y variedad): Cebada, Meseta.

	Municipio	Cód .	Po l.	Parc.	Subp ar.	Uso 2013	Tipo riego	Sup. Catastral (Ha)	Pendiente (%)
5	Lizoáin	156	2	65	1	Tierra arable	Secano	2,48	6,7
				65	2	Tierra arable	Secano	4,36	14,4



**Figura 35. Parcela 5**

### **PARCELA 6. CAMINO LERRUZ**

Propietario: S. C. Berasain Dominguez, Félix y Gemma.

Cultivo (Especie y variedad): Trigo blando, Camargo.

	Municipio	Cód.	Pol.	Parcela	Uso 2013	Tipo riego	Sup. Catastral (Ha)	Pendiente (%)
6	Lizoáin	156	4	55	Tierra arable	Secano	4,7	6,5



**Figura 36. Parcela 6**

### **PARCELA 7. GALDAIRU**

Propietario: Eslava Huarte, Vicente.

Cultivo (Especie y variedad): Trigo blando, Camargo.

	Municipio	Cód.	Pol.	Parcela	Uso 2013	Tipo riego	Sup. Catastral (Ha)	Pendiente (%)
7	Lizoáin	156	4	59	Tierra arable	Secano	5,46	7,8



**Figura 37. Parcela 7**

### **PARCELA 8. EL LLANO 3**

Propietario: Marichalar Silva, Isabel.

Cultivo (Especie y variedad): Cebada, Meseta.

	Municipio	Cód.	Pol.	Par.	Subpar.	Uso 2013	Tipo riego	Sup. Catastral (Ha)	Pendiente (%)
8	Lónguida	158	18	21	1	Tierra arable	Secano	23,77	2,4



**Figura 38. Parcela 8**



### **PARCELA 9. MUGA LIBERRI**

Propietario: Jaso Zapatería, Francisco Javier.

Cultivo (Especie y variedad): Trigo blando, Berdún.

	Municipio	Cód.	Pol.	Parc.	Subp.	Uso 2013	Tipo riego	Sup. Catastral (Ha)	Pendiente (%)
9	Lónguida	158	19	107	1	Tierra arable	Secano	6,84	12,8



Figura 39. Parcela 9

## ANEXO 2: DATOS DE CAMPO

	Humedad suelo (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )								
Cultivo	Cebada					Trigo			
	Opal	Meseta	Meseta	Meseta	Meseta	Bokaro	García	Camargo	Berdún
Fecha	P 7	P 2	P 3	P 5	P 8	P 1	P 4	P 6	P 9
01/03/2012	0,153	0,167	0,18	0,17	0,181	0,136	0,144	0,165	0,096
08/03/2012	0,181	0,216	0,23	0,19	0,192	0,19	0,184	0,183	0,149
15/03/2012	0,141	0,187	0,19	0,162	0,174	0,166	0,151	0,156	0,115
22/03/2012	0,23	0,254	0,263	0,235	0,26	0,235	0,224	0,242	0,114
02/04/2012	0,134	0,164	0,166	0,141	0,16	0,116	0,123	0,159	0,233
11/04/2012	0,237	0,256	0,26	0,237	0,262	0,226	0,222	0,248	0,253
18/04/2012	0,245	0,259	0,264	0,241	0,269	0,241	0,246	0,263	0,26
02/05/2012	0,276	0,27	0,217	0,247	0,257	0,259	0,246	0,283	0,259
08/05/2012	0,279	0,292	0,291	0,26	0,269	0,258	0,253	0,286	0,251
21/05/2012	0,268	0,284	0,284	0,257	0,257	0,262	0,259	0,283	0,152
29/05/2012	0,176	0,195	0,193	0,172	0,163	0,169	0,164	0,18	0,199
05/06/2012	0,218	0,24	0,233	0,212	0,188	0,212	0,211	0,225	0,182
12/06/2012	0,184	0,2	0,194	0,188	0,163	0,178	0,189	0,183	0,182
18/06/2012	0,132	0,166	0,284	0,135	0,138	0,11	0,125	0,096	0,105
26/06/2012	0,162	0,235	0,21		0,168	0,104	0,088	0,066	0,111
13/07/2012	0,117	0,184	0,18	0,172		0,078	0,082	0,075	0,064
24/07/2012	0,135	0,081	0,18	0,175	0,184	0,067	0,085	0,074	0,08

Fenología (Estados fenológicos según la escala de Zadok)									
Cultivo	Cebada					Trigo			
	Opal	Meseta	Meseta	Meseta	Meseta	Bokaro	García	Camargo	Berdún
Fecha	P 7	P 2	P 3	P 5	P 8	P 1	P 4	P 6	P 9
01/03/2012	Z26-28	Z23-25	Z22-24	Z24-26	Z23-24	Z21-23	Z24-26	Z22-23	Z24-26
15/03/2012	Z26-28	Z24-25	Z22-23	Z26-28	Z24-26	Z22-23	Z22-23	Z23-24	Z22-23
02/04/2012	Z32	Z32	Z30	Z32	Z32	Z31	Z31	Z31	Z31
11/04/2012	Z39	Z39	Z31	Z37	Z37	Z32	Z37	Z37	Z32
18/04/2012	Z37	Z40	Z39	Z42	Z42	Z37	Z37	Z37	Z37
02/05/2012	Z40-45	Z52-59	Z45-49	Z55	Z49-55	Z39	Z39	Z39-42	Z42-45
08/05/2012	Z50-55	Z55-59	Z50-55	Z45-50	Z55-59	Z39-40	Z39-40	Z39-40	Z45-49
21/05/2012	Z71	Z75	Z79	Z60	Z79	Z59	Z59	Z59	Z69
29/05/2012	Z83-85	Z85	Z85	Z85	Z85	Z70	Z70	Z70	Z70-71
05/06/2012	Z85-87	Z85-87	Z85-87	Z83-85	Z87	Z75-77	Z70-73	Z75	Z75-80
18/06/2012	Z89	Z93-97	Z92	Z87	Z93-97	Z85	Z83-85	Z83-85	Z85-87
26/06/2012	Z92	COSECHADO	COSECHADO		Z97	Z85	Z85	Z85	Z87-89
13/07/2012	COSECHADO	COSECHADO	COSECHADO	COSECHADO	COSECHADO	COSECHADO	Z92	Z92	COSECHADO
24/07/2012	COSECHADO	COSECHADO	COSECHADO	COSECHADO	COSECHADO	COSECHADO	COSECHADO	COSECHADO	COSECHADO



Biomasa seca (kg/ha)									
Cultivo	Cebada					Trigo			
	Opal	Meseta	Meseta	Meseta	Meseta	Bokaro	García	Camargo	Berdún
Fecha	P 7	P 2	P 3	P 5	P 8	P 1	P 4	P 6	P 9
01/03/2012	2073	1158	838	1262	1791	871	900	1159	1479
15/03/2012	1199,8	1174,4	1367,2	1623,2	959,4	1084,3	1133,5	792,2	1062,5
02/04/2012	3483,7	2461,9	1664,9	2962,3	3541,4	2412,5	3075,8	2202	3333,3
11/04/2012	5581,3	4451,2	3809,4	5057,9	6197,8	3686,2	4621,7	5118,4	5125
18/04/2012	4956,4	4200,6	3921,4	5015,6	4936,7	3476,3	4377,3	4870,4	6520,8
02/05/2012	8299,2	6739,9	5238,1	7710,3	8855	5137,2	6011,9	6864,8	7187,5
08/05/2012	8292,2	7146,4	7595,2	7764	9087,2	7562,8	8421,5	7563,1	9187,5
21/05/2012	12442	10812	9639,6	10936	10259	11053	8291,9	10501	10583
05/06/2012	17623	12680	13058	14248	14562	13001	12645	13864	14895
18/06/2012	18860	14385	13266	14779	17088	15835	17661	20124	15625
26/06/2012	0	0	0	0	0	17813	0	17953	0

Biomasa húmeda (kg/ha)									
Cultivo	Cebada					Trigo			
	Opal	Meseta	Meseta	Meseta	Meseta	Bokaro	García	Camargo	Berdún
Fecha	P 7	P 2	P 3	P 5	P 8	P 1	P 4	P 6	P 9
01/03/2012	635,410839	375,595238	256,153846	444,09632	621,706731	253,141026	316,020833	281,684982	468,75
15/03/2012	446,564685	356,309524	330,316742	474,090909	385,721154	332,788462	421,479167	292,078755	433,333333
02/04/2012	1981,5472	1377,91667	1472,64706	1736,7316	1899,94391	1191,05769	1670,97917	1236,95971	1562,5
11/04/2012	3147,70979	2635,65476	2026,727	2734,54004	3186,45833	1883,87821	2753,29167	2770,95696	2741,66667
18/04/2012	2796,57634	2282,5	2036,68929	2693,43074	2729,96795	1887,75641	2379,41667	2685,65018	3356,25
02/05/2012	4092,97203	2935	2246,96833	3584,52381	3829,53526	2528,75	2803,54167	4183,9011	3322,91667
08/05/2012	4648,22261	3471,19048	3878,1825	4091,27165	4720,6891	4359,64744	4997,10417	5174,30403	5170,83333
21/05/2012	5753,3479	5039,52381	4156,33484	4606,03355	4450,05609	6081,08974	5175,60417	6544,45971	4933,33333
05/06/2012	4257,32517	2970,83333	3191,16893	3268,55519	3100,15224	3995,44872	3877,91667	4815,50366	4002,08333
18/06/2012	2953,30711	1939,64286	2141,19155	2123,85823	2044,59135	3449,10256	4432,97917	5239,00641	2975
26/06/2012	1911,04312	0	0	0	1414,41506	2807,62821	2991,95833	3788,32875	2479,16667

Índice de Biomasa (plantas*m/m <sup>2</sup> )									
Cultivo	Cebada					Trigo			
	Opal	Meseta	Meseta	Meseta	Meseta	Bokaro	García	Camargo	Berdún
Fecha	P 7	P 2	P 3	P 5	P 8	P 1	P 4	P 6	P 9
01/03/2012	17,60	16,71	4,82	15,44	20,57	9,74	20,08	9,14	21,76
15/03/2012	21,03	25,84	9,85	20,03	30,02	13,62	33,73	13,82	34,26
02/04/2012	55,81	70,65	25,65	45,95	55,64	31,15	59,73	32,01	53,24
11/04/2012	84,09	99,34	37,33	64,48	75,96	40,29	74,63	41,06	69,91
18/04/2012	98,23	119,26	38,25	77,35	87,43	50,11	83,20	47,65	84,26
02/05/2012	149,22	170,82	57,96	117,84	138,07	76,53	112,80	68,94	114,35
08/05/2012	173,19	196,90	70,02	135,05	154,37	90,33	127,26	80,53	128,70
21/05/2012	191,91	177,77	68,48	127,87	143,82	108,76	149,71	84,81	140,74
05/06/2012	168,05	168,56	63,58	122,56	142,32	108,17	158,49	90,97	144,44
18/06/2012	168,08	170,75	65,27	119,44	137,43	112,15	158,01	91,67	136,11
26/06/2012	155,44	28,17	8,26	136,01	132,84	107,50	160,87	94,19	139,81

Altura Cubiertas (cm)									
Cultivo	Cebada					Trigo			
	Opal	Meseta	Meseta	Meseta	Meseta	Bokaro	García	Camargo	Berdún
Fecha	P 7	P 2	P 3	P 5	P 8	P 1	P 4	P 6	P 9
01/03/2012	9,75	8	5,875	10,875	12,75	7,75	11,5	8,5	11,75
15/03/2012	11,875	12,5	12	14,125	18,75	10,75	18,875	12,875	18,5
02/04/2012	31	34	31,25	32,25	34,75	24,5	33,75	30	28,75
11/04/2012	47,25	47,875	45,5	45,25	47,25	31,875	42,25	38,5	37,75
18/04/2012	55,25	57,5	46,75	54,25	54,5	39,5	47,25	44,75	45,5
02/05/2012	83,75	82,25	71,25	83	86	60,5	63,25	64,75	61,75
08/05/2012	97,75	94,75	85,5	95	96	71,5	72	75,5	69,5
21/05/2012	108,25	85,75	83,5	90,5	89,25	85,75	84,75	79,75	76
05/06/2012	94,75	81,25	77,5	86,5	88,5	85,25	89,25	85,5	78
18/06/2012	94,75	82,25	79,25	84,25	85,5	88,5	89,25	86	73,5
26/06/2012	88	13,5	13	91,33	82,5	84,75	90,25	88,25	75,5

## ANEXO 3: TUTORIAL SENTINEL-1 TOOLBOX

Sentinel-1 Toolbox es un software libre desarrollado por la ESA, Agencia Espacial Europea. El programa está preparado para la lectura, procesamiento, análisis y visualización de imágenes de la ESA (ERS -1/ 2, Envisat , SENTINEL - 1 ) y de otros satélites (TerraSAR - X, RADARSAT 1-2, COSMO - SkyMed , JERS- 1, ALOS PALSAR ) SAR que tienen un nivel de procesamiento de nivel 1 o superior.

### 1. Descarga del programa

El programa se encuentra disponible a través del siguiente enlace:

- <https://earth.esa.int/web/nest/downloads>

### 2. Manejo del programa

#### 2.1. Proyecto nuevo

- a) Crear un **NUEVO PROYECTO** (Figura 1)

Nest crea automáticamente una serie de carpetas estándar para organizar el trabajo que se va a realizar a continuación.

- b) Para abrir el fichero con el que se quiere trabajar:

**FILE** → **IMPORT RASTER DATA** → **TERRASAR-X**

- c) Para ver la imagen:

**PRODUCTS** → **OPEN IMAGE VIEW**

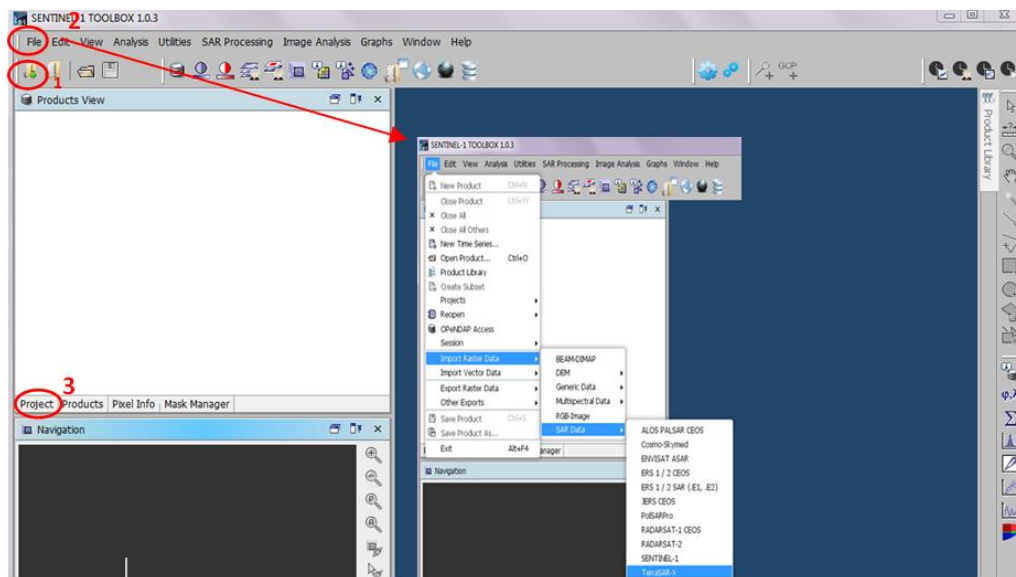


Figura 1. Crear nuevo proyecto.

## 2.2. Calibración radiométrica

**SAR PROCESSING → RADIOMETRIC → CALIBRATE (Figura 2)**

- I/O PARAMETERS: definir el nombre del producto a calibrar. Recomendación: mantener la carpeta que aparece por defecto.
- PROCESSING PARAMETERS: seleccionar las capas donde hay que aplicar la calibración.

Atención: la intensidad HH y VV se calibran en este paso.

**RUN**

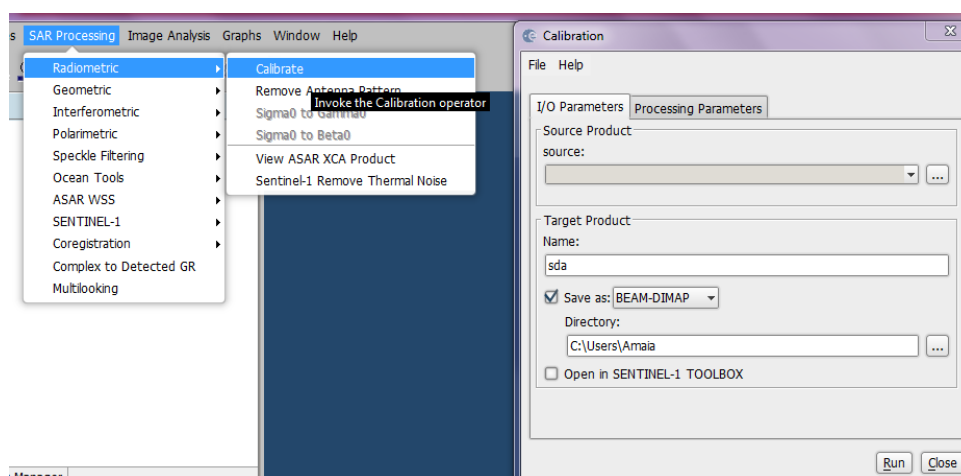


Figura 2. Calibración radiométrica.

### 2.3. Conversión LINEAL: DB

UTILITIES → DATASETCONVERSION → LINEARTO/FROM DB (Figura 3)

Would you like to convert ban sigma0\_vv into dB in a new virtual band? → Yes

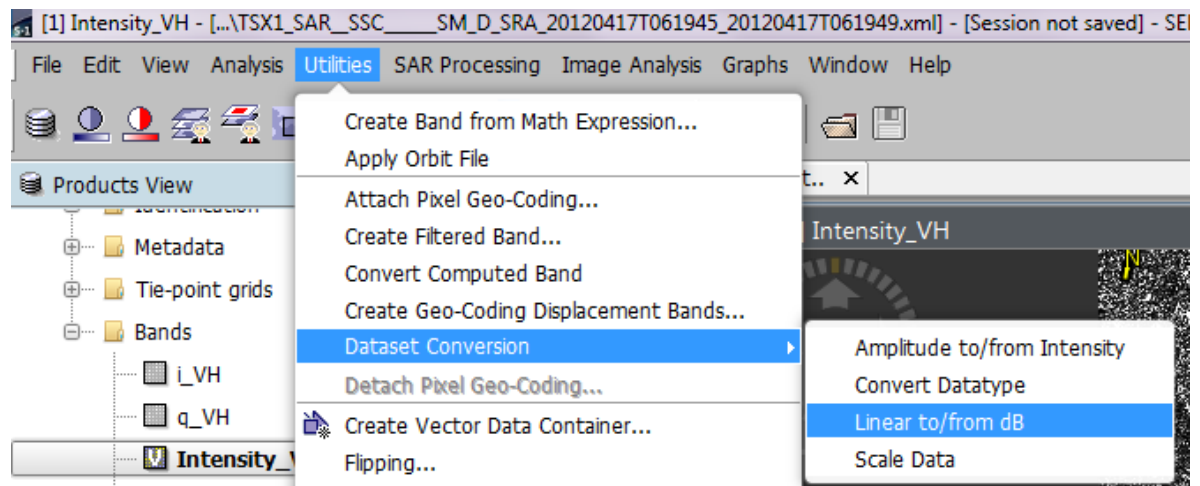


Figura 3. Conversión lineal.

### 2.4. Multilooking

SAR PROCESSING → MULTILOOKING (Figura 4)

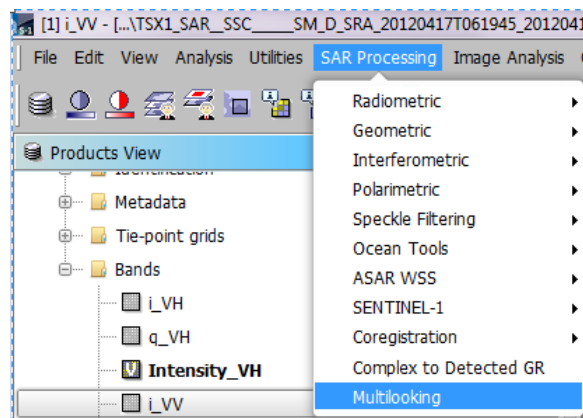


Figura 4. Multilooking.

Se despliegan las siguientes ventanas, Figura 5.

- I/O PARAMETERS: definir el nombre del archivo de salida.
- PROCESSING PARAMETERS: seleccionar: Intensity\_VH y Intensity\_VV y completar los siguientes apartados.

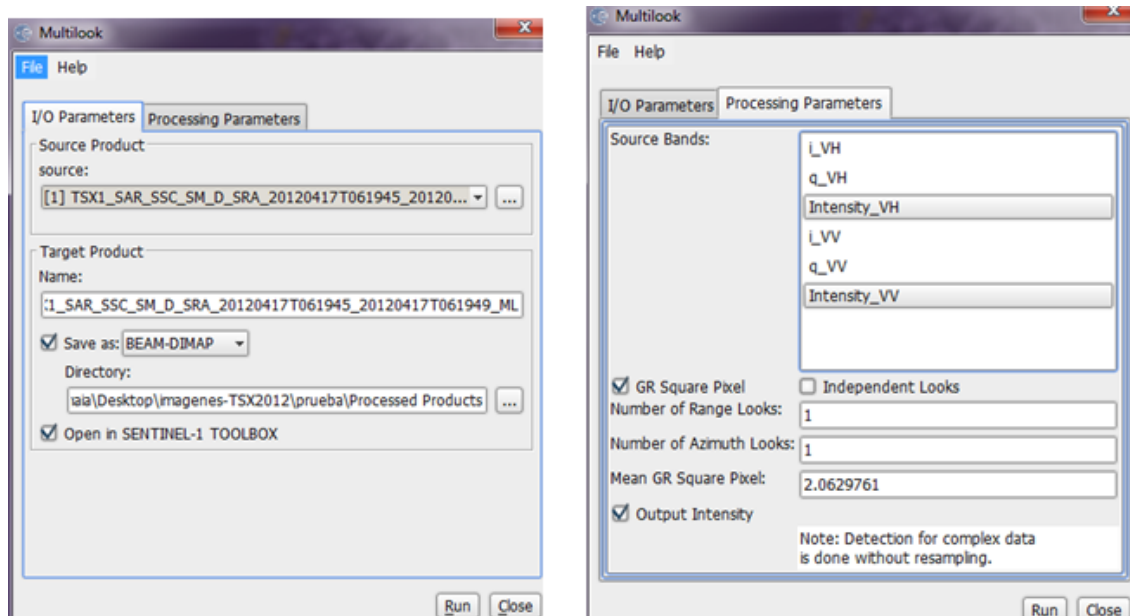


Figura 5. Parámetros de procesamiento de Multilooking.

- RUN

## 2.5. Geocoding (Ortorectificación)

**SAR PROCESSING → GEOMETRIC → TERRAIN CORRECTION → SAR SIMULATION  
TERRAIN CORRECTION (Figura 6)**

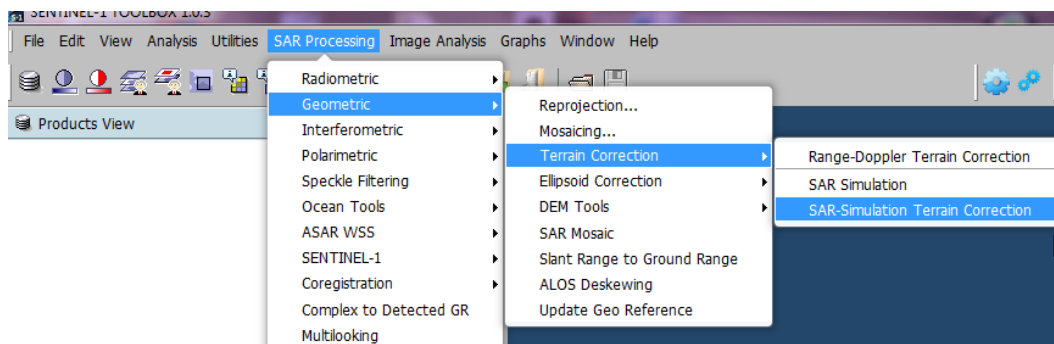
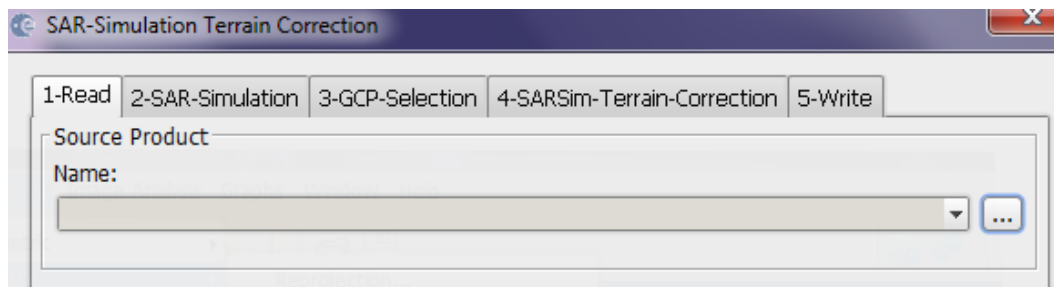


Figura 6. Abrir la corrección geométrica.



Se despliega la siguiente ventana, Figura 7, en la que tenemos que seguir 5 pasos:



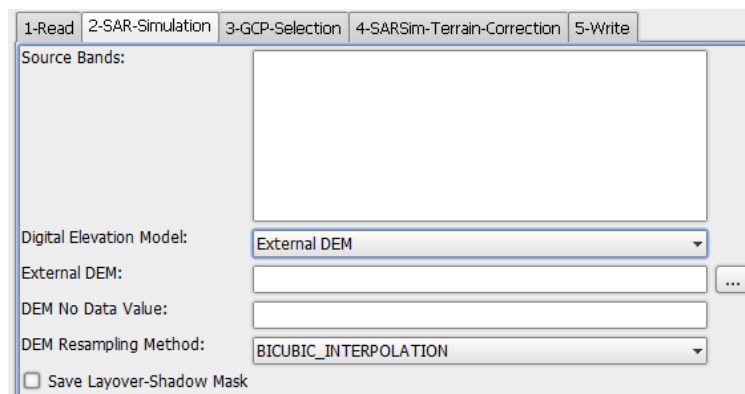
**Figura 7. Terrain Corection.**

**1. Read.**

Seleccionar el producto a georreferenciar.

**2. SAR-Simulation.**

Elegir el DEM con el que se va a trabajar. Puede ser un DEM del propio programa o uno externo, ver Figura 8.



**Figura 8. SAR-Simulation.**

**3. GCP-Selection.**

Definir el número de GCP, puntos de control para la corrección, Figura 9.

1-Read	2-SAR-Simulation	3-GCP-Selection	4-SARSim-Terrain-Correction	5-Write
Number of GCPs:		2000		
Coarse Registration Window Width:		64		
Coarse Registration Window Height:		64		
Row Interpolation Factor:		2		
Column Interpolation Factor:		2		
Max Iterations:		2		
GCP Tolerance:		0.5		
<input type="checkbox"/> Apply Fine Registration				
Coherence Window Size:				
Coherence Threshold:				
Fine Registration Window Width:		8		
Fine Registration Window Height:		8		
<input checked="" type="radio"/> Compute Coherence with Sliding Window				
<input type="checkbox"/> Estimate Coarse Offset				
<input checked="" type="checkbox"/> Test GCPs are on land				

**Figura 9. GCP-Selection.**

#### 4. SARSim-Terrain-Correction.

Definir la resolución espacial en metros y seleccionar la zona de proyección y el resto de parámetros, Figura 10.

1-Read	2-SAR-Simulation	3-GCP-Selection	4-SARSim-Terrain-Correction	5-Write
RMS Threshold (pixel accuracy):		1.0		
WARP Polynomial Order:		1		
Image Resampling Method:		BILINEAR_INTERPOLATION		
Source GR Pixel Spacings (az x rg):		0.0(m) x 0.0(m)		
Pixel Spacing (m):		5		
Pixel Spacing (deg):		4.4915764205976074E-5		
Map Projection:		UTM Zone 30 / World Geodetic System 1984		
<input type="checkbox"/> Local incidence angle		<input checked="" type="checkbox"/> Projected local incidence angle		
<input checked="" type="checkbox"/> Selected source band		<input type="checkbox"/> DEM		
<input type="checkbox"/> Latitude & Longitude				
<input type="checkbox"/> Apply radiometric normalization				
<input type="checkbox"/> Save Sigma0 band		Use projected local incidence angle from DEM		
<input type="checkbox"/> Save Gamma0 band		Use projected local incidence angle from DEM		
<input type="checkbox"/> Save Beta0 band				
Auxiliary File (ASAR only):		Latest Auxiliary File		
<input type="checkbox"/> Show Range and Azimuth Shifts				
<input type="checkbox"/> Show Residuals				

**Figura 10. SARSim-Terrain-Correction.**

#### 5. Write

Nombre del archivo de salida, Figura 11.

### Process.

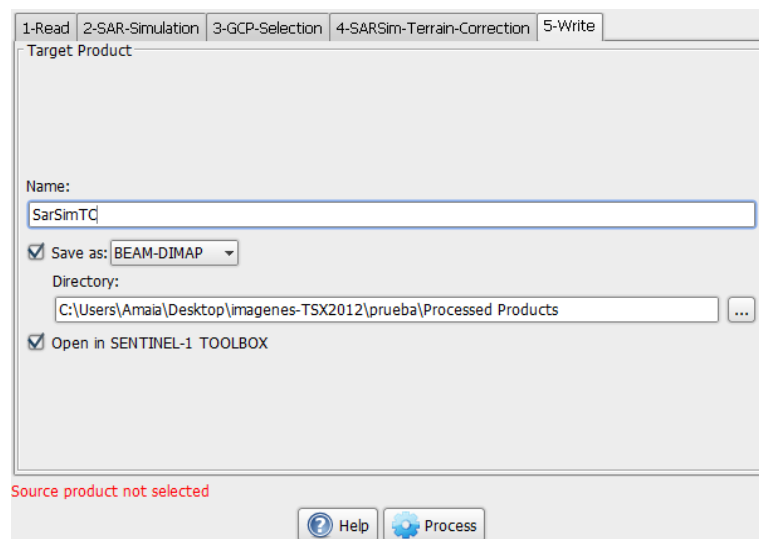


Figura 11. Write.

## 2.6. Rgb-composite (Composición rojo-verde-azul)

**VIEW → OPEN RGB IMAGE VIEW (Figura 12)**

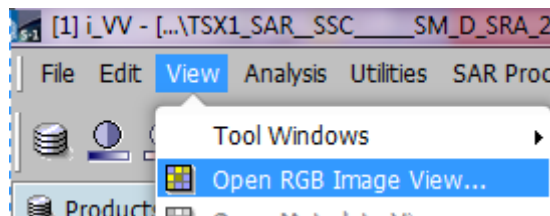
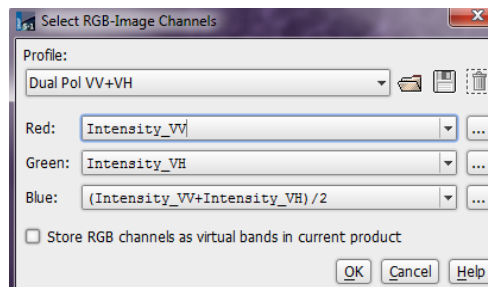


Figura 12. Composición RGB.

A continuación seleccionar las bandas que van a formar la nueva imagen (Figura 13).

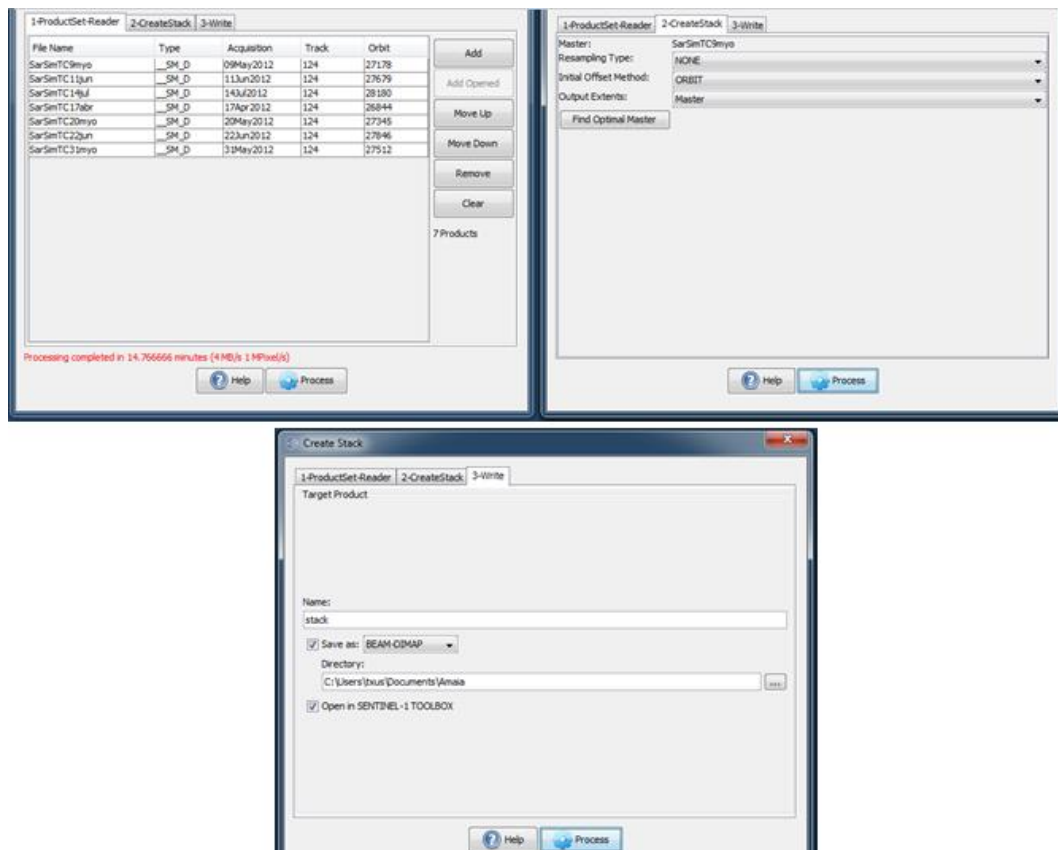


**Figura 13. Seleccionar las bandas.**

## 2.7. Stack

Se utiliza para formar una imagen a partir de otras para recopilar información o trabajar sobre una única imagen.

**UTILITIES** → **CREATE STACK (Figura 14)**



**Figura 14. Crear un Stack**

