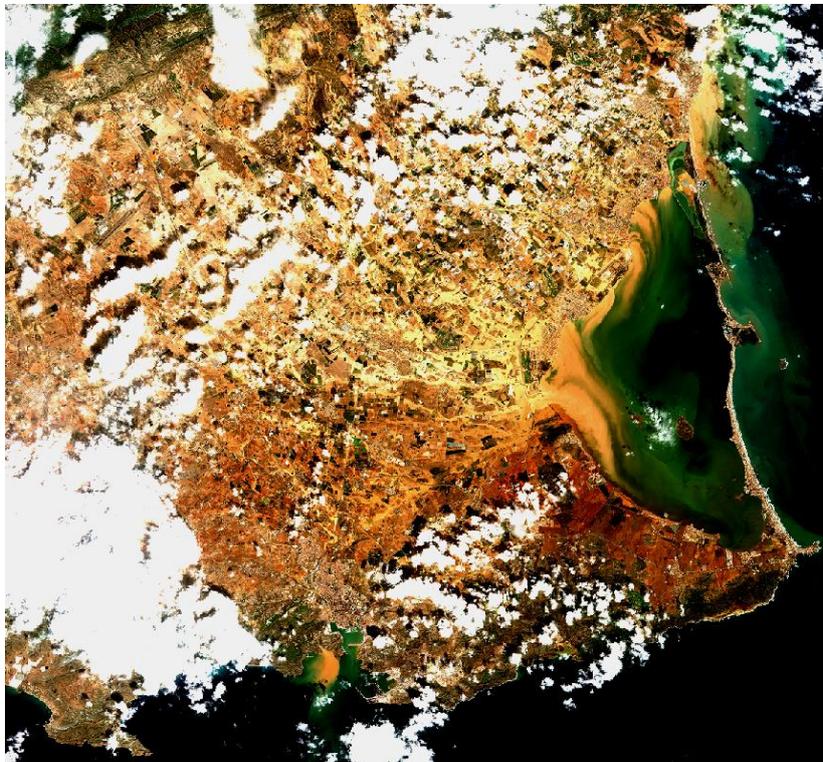


MEMORIA

Definición dinámica de los usos del suelo a escala mensual mediante imágenes de satélite. Primeros pasos para la caracterización y modelización de la transferencia de nitratos al flujo subsuperficial en suelos con agricultura intensiva en el Campo de Cartagena



Titulación: Máster en Ciencia y Tecnología del Agua y del Terreno

Autor: Manuel Mas Monsonis

Directores: Dr. Juan T. García Bermejo
Dr. Manuel Alcaraz Aparicio

Cartagena, octubre de 2019

Agradecimientos:

En primer lugar, agradecer profundamente la dedicación e implicación del codirector Dr. Manuel Alcaraz, que con sus conocimientos y saber hacer, ha velado por la realización de este Trabajo Fin de Máster.

Al Dr. Juan Bermejo, por su esfuerzo y aportes durante la realización de este proyecto.

A familiares, amigos y todos aquellos que me han acompañado a lo largo de estos años. Gracias.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
RESUMEN	6
ABSTRACT.....	7
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	8
1.1. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	8
1.2. ANTECEDENTES	11
1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER	14
1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER	16
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DE TÉMEZ.....	20
2.1. JUSTIFICACIÓN DE ELECCIÓN DEL MODELO.....	20
2.2. ECUACIONES QUE RIGEN EL MODELO	24
2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS REQUERIDOS.....	29
2.3.1. <i>Variables meteorológicas:</i>	29
2.3.2. <i>Litología y edafología de la región:</i>	31
2.3.3. <i>Usos del suelo:</i>	34
2.3.4. <i>Mapa de pendientes y orientaciones:</i>	43
2.3.5. <i>Parámetros hidrogeológicos:</i>	47
CAPÍTULO 3: CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES SATÉLITE	48
3.1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE IMÁGENES.....	48
3.2. TRATAMIENTO DIGITAL DE LA IMÁGENES SATÉLITE PREVIO A LA CLASIFICACIÓN	50
3.2.1. <i>Correcciones radiométricas:</i>	54
3.2.2. <i>Correcciones geométricas:</i>	55
3.2.3. <i>Realces de imagen:</i>	55
3.3. MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN	59
3.3.1. <i>Fase de entrenamiento:</i>	60
3.3.2. <i>Clasificación no supervisada:</i>	64
3.3.3. <i>Clasificación supervisada:</i>	67
3.4. PONDERACIÓN DE LA BONDAD DE CLASIFICACIÓN.....	70
3.4.1. <i>Fase de muestreo:</i>	72
3.4.2. <i>Tamaño de la muestra:</i>	75
3.4.3. <i>Elaboración de matrices de confusión:</i>	76
3.4.4. <i>Elaboración de estadísticos:</i>	78

CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	80
4.1. DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	80
4.2. CARACTERIZACIÓN AGRARIA	87
4.3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	93
CAPÍTULO 5: FUENTES Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	99
5.1. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SATÉLITE E INFORMACIÓN DE USOS DEL SUELO.....	101
5.1.1. <i>Obtención de las imágenes satélite:</i>	102
5.1.2. <i>Obtención de información referente a la ocupación del suelo:</i>	104
5.1.3. <i>Modelos de elevación del terreno:</i>	107
5.2. ADQUISICIÓN DE SERIES METEOROLÓGICAS Y DATOS ORIENTATIVOS DE REGADÍO....	108
5.3. COLECCIÓN DEL RESTO DE VARIABLES REQUERIDAS EN EL MODELO DE TÉMEZ.....	110
5.4. PROGRAMAS INFORMÁTICOS EMPLEADOS.....	112
CAPÍTULO 6: METODOLOGÍA.....	114
6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS USOS DEL SUELO.....	114
6.1.1. <i>Definición de la región de estudio:</i>	115
6.1.2. <i>Características de las imágenes:</i>	116
6.1.2.1. <i>Nivel 0 de Procesamiento:</i>	117
6.1.2.2. <i>Nivel 1 de Procesamiento:</i>	117
6.1.2.3. <i>Nivel 2A de Procesamiento:</i>	118
6.1.3. <i>Pretratamiento de las imágenes.</i>	121
6.1.4. <i>Condiciones para realizar una clasificación supervisada:</i>	125
6.1.5. <i>Definición de las regiones de entrenamiento:</i>	128
6.1.6. <i>Clasificación de la imagen:</i>	131
6.1.7. <i>Mejora de la clasificación:</i>	134
6.1.8. <i>Construcción de la matriz de confusión:</i>	136
6.1.9. <i>Detección de cambios:</i>	138
6.2. ELABORACIÓN DE UN MODELO DE TÉMEZ MEDIANTE EL EMPLEO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	142
6.2.1. <i>Confección de los mapas de variables:</i>	142
6.2.1.1. <i>Variables climáticas:</i>	143
6.2.1.2. <i>Regionalización geológica:</i>	147
6.2.1.3. <i>Regionalización de los usos del suelo:</i>	150
6.2.1.4. <i>Asignación de valores de regadío:</i>	155
6.2.1.5. <i>Parámetros hidrogeológicos:</i>	171
6.2.1.6. <i>Pendientes y orientaciones:</i>	173
6.2.2. <i>Diseño de las ecuaciones y aplicación en los SIG:</i>	175
6.2.3. <i>Automatización mediante Model Builder:</i>	177

CAPÍTULO 7: RESULTADOS Y ANÁLISIS	180
7.1. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES.	181
7.1.1. Validación de los resultados:	183
7.1.2. Evolución de los usos del suelo en el Campo de Cartagena:	187
7.1.3. Detección de cambio en los usos del suelo:.....	190
7.2. RESULTADOS DE LA ELABORACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO DE TÉMEZ CON IMÁGENES SATÉLITE.....	196
7.2.1. Balance hídrico del suelo:	197
7.2.2. Detección de las zonas en las que se produce infiltración:	199
7.2.3. Comparativa de resultados al modelizar una cuenca con resoluciones espaciales diferentes:	200
7.2.4. Estimación de la recarga del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena (Validación de resultados hidrológicos):	202
7.2.5. Comparación con el modelo hidrológico SWAT:	204
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES	207
CAPÍTULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	212
CAPÍTULO 10: ANEJOS	218

RESUMEN

En el presente proyecto se simula la infiltración mensual que se produce en suelos en los que se practica la agricultura intensiva en una zona sensible al aporte de nutrientes, como es el entorno del Campo de Cartagena. Se trata de una fase de investigación inicial, con la que poder plantear posteriores trabajos orientados a caracterizar y modelizar la transferencia de nitratos.

Para ello, se ha seguido la metodología empleada en la evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España (Teodoro Estrela Monreal, Francisco Cabezas Calvo-Rubio y Federico Estrada Lorenzo, 1999) y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) a través del Sistema Integrado para la Modelización del proceso Precipitación Aportación, conocido como SIMPA.

Con la revisión de los antecedentes, se ha construido un modelo hidrológico de Témex de paso mensual mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La elaboración del modelo ha consistido en la colección y caracterización de las variables que este requiere, de acuerdo a las características de la zona de estudio. Mediante el empleo de la teledetección, se han clasificado 12 imágenes satélite logrando identificar la ocupación de los usos del suelo. Adicionalmente, la teledetección ha detectado aquellas parcelas en las que se realizan cultivos de regadío, permitiendo simular una aportación hídrica de acuerdo a las necesidades de los mismos.

La combinación de los SIG con el modelo hidrológico planteado, ha mostrado su aptitud al lograr caracterizar hidrológicamente con una elevada resolución la totalidad de la zona de estudio, permitiendo detectar las elevadas dispersiones hidrológicas que se producen en una región con clima semi-árido en la que existen zonas de regadío. La teledetección, ha permitido identificar estas zonas y localizarlas, estableciéndolas como posibles puntos de infiltración de nutrientes hacia los acuíferos presentes en la zona. La clasificación supervisada de las imágenes ha ayudado a mejorar la comprensión de la región, mostrando aptitud para detectar posibles problemáticas ambientales. El modelo hidrológico se ha mostrado robusto en su aplicación, identificándose finalmente sus posibles limitaciones y dificultades de aplicación para un clima mediterráneo árido.

ABSTRACT

The aim of this project is to characterize water infiltration in a territory where irrigated crops have place. The zone of study is located in SE Spain and is mainly characterized by its small annual precipitation amount and an environment sensitive to nitrate additions. This study pretends to be an initial investigation phase, where bases are set to held future nitrate simulations.

To achieve this objective, a bibliographic revision has been realized. The methodology followed is mainly the one employed for the evaluation of hydrological resources in Spain, collected from *El Libro Blanco del Agua en España* (Teodoro Estrela Monreal, Francisco Cabezas Calvo-Rubio y Federico Estrada Lorenzo, 1999), and stablished by *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)* by its application in the Precipitation-Contributions Integrated System Model, commonly known as SIMPA.

With a background revision, a monthly temporal resolution Témez hydrological model has been developed through the use of Geographical Information Systems (SIG). The model development has consisted in data characterization and collection according to the variability of the zone of study. Furthermore, using remote sensing technics, 12 different satellite images have been classified identifying different land uses according to the hydrological model needing. In addition, ground classification has identified those parcels where irrigated crops are cultivated, allowing to simulate water necessities in the hydrological model.

The results of this case of study, have shown the potential of combining hydrological models with GIS and remote sensing techniques, permitting to simulate and characterize with a high spatial resolution the hydrology of the zone, detecting the scatter between cultivated and non-cultivated fields. Remote sensing application, has identified and localized crops fields, stablishing them as potentials zones where nitrate percolations may occur. The supervised classification of satellite imagery became a reliable source of information, demonstrating its aptitudes detecting possible environmental issues. Finally, strength and weakness according to the methodology and the hydrological model employed have been detected, summarizing them in the chapter dedicated to conclusions.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Circunscrito en los municipios de San Pedro del Pinatar, San Javier, Los Alcázares y Cartagena, con sus 135 km² de extensión, el Mar Menor se alza como un enclave único para la preservación de la flora y la fauna, estando por ello incluido en la Red Natura 2000, con el estatus de Parque Natural, Lugar de Interés Comunitario (LIC) y Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA). Debido a la bondad del clima y la singularidad del entorno, el Mar Menor se erige como un destino turístico de referencia, proyectando a la Región de Murcia no solamente a nivel regional, sino también en el ámbito nacional e internacional.

Debido a la presión antropogénica sobre el entorno, recientemente se han vivido episodios de eutrofización de sus aguas. La eutrofización está causada por una concentración excesiva de nutrientes en el agua, provenientes principalmente de la actividad agrícola intensiva y residencial, que permite al fitoplancton desarrollarse de manera excesiva creando el denominado “bloom algae” siendo conocido popularmente como “sopa verde”. De esta forma, se dificulta la llegada de la radiación solar al fondo de la laguna y la oxigenación del agua, creando en última instancia, un entorno anóxico en el que los seres vivos padecen, acarreando la pérdida de biodiversidad en un entorno singular protegido. En consecuencia, la eutrofización es un fenómeno negativo que no ha afectado solamente a la biodiversidad de la laguna, sino que también ha constituido una pérdida de atractivo turístico y económico proyectando al exterior una imagen negativa.

A la vista de la gravedad del problema, se expone la necesidad de adoptar medidas urgentes con las que garantizar la sostenibilidad ambiental y realizar un seguimiento de la evolución de la zona afectada. Estas máximas se hacen realidad con la aprobación de la **Ley 1/2018, de 7 de febrero** y el posterior **Plan**

de Gestión Integral de los Espacios Protegidos Mar Menor y Franja Litoral en el que se definen acciones con las que reducir la entrada de nutrientes, tales como un manual de buenas prácticas agrarias o la instalación de tanques de tormenta, que retengan la carga contaminante proveniente del lavado inicial de las calles por el agua de escorrentía.

En el **Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor, de 6 de febrero de 2017**, se demuestra que la contaminación por nitratos no afecta solamente al Mar Menor, sino que también ocurre en el acuífero superior del Campo de Cartagena, el denominado como acuífero Cuaternario, debido principalmente, aunque no únicamente, a las prácticas agrícolas intensivas. Los nitratos que han percolado hasta el acuífero son descargados a la laguna mediante la interconexión existente entre ambos sistemas hidrológicos, siendo este uno de los factores que ha contribuido a romper el equilibrio existente.

En esta coyuntura, resulta de gran utilidad la obtención repetida de imágenes de una misma zona a lo largo de un periodo de tiempo, con las que detectar los cambios que se producen para finalmente, lograr identificarlos y realizar seguimientos ambientales. La captura desde el espacio de imágenes de la superficie terrestre y su posterior tratamiento se denomina teledetección. La obtención de dichas imágenes se realiza a bordo de satélites espaciales, puestos en órbita por iniciativas públicas o privadas. Entre ellas, destaca el inicio a principios de la primavera de 2014, del programa de observación espacial Copérnico, liderado por la Comisión Europea (CE) y la Agencia Espacial Europea (ESA). Dicho programa incluye el lanzamiento de seis misiones espaciales Sentinel destinadas a la gestión del suelo, el medio marino, la atmósfera, la seguridad y el cambio climático, con la puesta en órbita de más de 30 satélites, la creación de un software específico para el tratamiento de las imágenes y un portal web con el que poder acceder a las imágenes generadas de forma gratuita. La inversión realizada por la Comisión en dicho programa asciende a un total de 6.700 millones de euros.

Englobada dentro del programa Copérnico, la misión Sentinel-2 ofrece imágenes multispectrales de gran resolución, estando específicamente diseñada para monitorizar la cubierta vegetal, los usos del suelo y las aguas. A la vista del

cometido de la misión y de la aptitud de la teledetección como herramienta con la que realizar la monitorización de los usos del suelo, para la realización del presente proyecto, se han descargado y posteriormente tratado digitalmente veinticuatro imágenes satélites captadas por la misión Sentinel-2 durante un periodo de tiempo comprendido desde octubre de 2017 hasta septiembre de 2018.

En este trabajo, se ha empleado la capacidad de monitorización del territorio que ofrece la teledetección y en concreto la misión Sentinel-2, para determinar y definir los usos del suelo en la región definida por el ***Decreto-Ley nº 1/2017, de 4 de abril, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor***. De esta forma, se persigue obtener información detallada sobre la actividad agrícola intensiva de la zona, identificando los principales puntos dónde se produce infiltración de nitratos debido a cultivos intensivos.

Una vez se ha realizado la identificación de los usos del suelo y los principales cultivos existentes, se está en disposición de asignar a cada uno de ellos, valores de regadío de acuerdo a las necesidades hídricas particulares de cada cultivo. En este Trabajo Fin de Máster, se emplea el modelo hidrológico de paso mensual de Témex, con el que poder determinar a partir de valores climáticos, edafológicos y litológicos, la infiltración que se produce en la zona establecida en el ***Decreto-Ley nº 1/2017, de 4 de abril***, como un primer paso para modelizar en estudios posteriores la transferencia de nitratos.

A la vista de las condiciones ambientales y las medidas que se han tomado desde los organismos públicos para preservar el Mar Menor y su entorno, se considera que este Trabajo Fin de Máster puede en primera instancia, lograr mejorar el conocimiento existente sobre la zona, permitiendo evaluar la influencia de los cultivos intensivos circundantes en el deterioro del ecosistema del Mar Menor y de esta forma, mejorar la toma de decisiones.

1.2. ANTECEDENTES

Debido a la estacionalidad y la irregularidad de las precipitaciones en las regiones con clima mediterráneo, se hace imprescindible evaluar los recursos hídricos disponibles, para de esta forma, asignarlos de una manera adecuada. En este trabajo, no se pretende realizar una evaluación de los recursos naturales disponibles, pero indirectamente, al determinar la infiltración que se produce desde capas superficiales, se logra determinar las aportaciones que se producen. Es por ello, que, aunque no se profundice en la simulación de los flujos superficiales, se requiere del uso de modelos hidrológicos con los que determinar la infiltración. Entre los modelos destinados a la evaluación de recursos de mayor relevancia realizados en el ámbito nacional, destaca el modelo de Simulación Precipitación-Aportación (SIMPA).

El SIMPA se trata de un modelo hidrológico desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), cuya finalidad es la evaluar los recursos hídricos en régimen natural. El método empleado fue el utilizado para evaluar los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España, publicado por el antiguo Ministerio de Medio Ambiente en 1998.

Para realizar la modelización de los recursos, el SIMPA cuenta con una resolución temporal mensual, dónde se introducen los datos de precipitación, evapotranspiración potencial y parámetros hidrológicos pertenecientes a la totalidad de la extensión del territorio del estado español. De esta forma, se logra realizar una estimación de los caudales medios mensuales, el almacenamiento estimado en las diferentes unidades acuífero, humedad del suelo, así como la obtención de valores de escorrentía superficial y subterránea. Finalmente, los resultados obtenidos se comprueban en estaciones de aforo, determinando de esta forma la bondad de la simulación y la metodología empleada.

Para modelizar la totalidad del territorio en el modelo SIMPA se emplean 500.000 celdas, lo que significa que cada una de ellas tiene 1 Km², por lo que, los resultados que ofrece el modelo también gozan de dicha resolución. Entre las bondades que aporta el modelo, destaca la facilidad de obtener los resultados y diferentes productos derivados, así como la posibilidad de obtener los datos de

entrada empleados en el modelo, con una resolución de 1Km². Dicha documentación es de propiedad pública y se encuentra disponible a fecha de septiembre de 2019 en la siguiente dirección web: <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/simpa.aspx>.

Como se ha comentado anteriormente, el modelo SIMPA se ha utilizado en el Libro Blanco del Agua en España. Este se trata de un proyecto de ámbito nacional destinado a caracterizar y abordar todas las cuestiones relacionadas con los recursos hídricos. Uno de los objetivos que persigue, es el de proveer de material extenso y riguroso fundamentado en bases documentales objetivas y explícitas. Otro punto de interés para la realización de este Trabajo Fin de Máster, que ofrece el Libro Blanco del Agua, es la recopilación de los datos a nivel nacional que determinan el comportamiento hidrológico. Anteriormente a la publicación de este documento, los datos se encontraban dispersos, ya sea en manos de organismos privados o bien en diferentes organismos de la administración pública. El hecho de centralizar en una misma publicación los parámetros disponibles ya resulta de por si interesante para el desarrollo de este proyecto.

Según el Libro Blanco del Agua, los resultados que en dicho documento se presentan, no pretenden ser detallados, sino que realmente se hace especial hincapié en la descripción técnica y la metodología empleada. Dadas las anteriores referencias, se establece que, dada la explicación detallada de la metodología empleada tanto en el modelo SIMPA como en el Libro Blanco del Agua, esta puede llegar a ser reproducida, total o parcialmente en la evaluación de la infiltración en las zonas sensibles a la aportación de nitratos, en el entorno del Mar Menor.

Debido al marco metodológico que se establece, surgen numerosos estudios destinados a la evaluación de los recursos hídricos, en los que se emplean modelos de Témex de paso temporal mensual, como es el caso del estudio ***Aplicación del modelo de Témex a la determinación de la aportación superficial y subterránea del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada para su implementación en un modelo de uso conjunto*** (Murillo J.M. y Navarro J.A; 2011).

En el estudio se emplea un modelo de Témez de paso mensual para calcular la aportación total, superficial y subterránea en régimen natural, en el área sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada. Se emplea un modelo tipo Témez por su relativa sencillez y su posible ventaja frente a otros modelos hidrológicos más complejos. Además, desde el gobierno de España, se han esponsorizado sesiones con las que se ha trabajado con la metodología desarrollada por el CEDEX en el modelo SIMPA. Es el caso de la III Jornada de SIG libre, titulada ***Implementación del modelo hidrológico de Témez para la evaluación de recursos hídricos con Grass GIS. Fase superficial y subterránea.*** (Potenciano de las Heras, A. y Villaverde Valero, J.J.; 2009)

Si se focaliza en la región de estudio, se han desarrollado diversos estudios concernientes a la evaluación de los recursos hídricos, tanto los desarrollados por el propio plan de cuenca de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS), como los realizados desde el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), así como otros de iniciativa privada, demandados por la propia comunidad de regantes para estimar los recursos de los que disponen.

Una de las diferencias que presenta este trabajo, respecto a los realizados anteriormente con un modelo Témez de periodo temporal mensual, es la caracterización del uso del suelo, estando en este trabajo realizada mediante teledetección. El uso del suelo, se trata de una variable de entrada para el modelo de Témez y dependiendo del tipo de uso, el suelo ofrece diferentes propiedades hidrológicas, por lo que su correcta determinación se antoja fundamental.

Para la determinación del uso de suelos, los modelos hidrológicos revisados emplean servicios predefinidos de ocupación de usos de suelos, provistos de manera gratuita por organismos gubernamentales cada cierto periodo de tiempo. Entre las fuentes más destacadas de información geográfica se encuentran el programa de Coordinación de Información del Entorno (CORINE), propuesto por la Comisión Europea (CE) en el año 1985 y el Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE), elaborado primeramente en el 2005 a partir de información disponible por las Comunidades Autónomas (CCAA) y la Administración General del Estado (AGE). El objetivo de estos programas es el

obtener una mayor comprensión del entorno, para de esta manera, poder evaluar los efectos de las políticas tomadas.

Entre las variables que se conocen a raíz de ellos destacan, la distribución geográfica y el estado ecológico de las áreas naturales, la abundancia de recursos hídricos o geológicos, la cubierta predominante del suelo y la cantidad de sustancias contaminantes descargadas al ecosistema. En estos proyectos, para que se defina un nuevo uso del suelo, la extensión mínima requerida es de 25 hectáreas, lo que representa una resolución de 158x158 metros. Actualmente, los programas SIOSE y CORINE emplean imágenes satélite obtenidas por la misión de observación espacial Sentinel-2 desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA).

1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Tal y como se ha mencionado en los antecedentes, la presión antropogénica en el entorno del Mar Menor, está alterando el frágil equilibrio que reinaba en la zona. Es por ello, que este trabajo pretende en primer lugar, ampliar el conocimiento sobre la infiltración de excedentes hídricos agrícolas a través de la identificación y caracterización de los cultivos existentes en la zona, mediante el empleo de la teledetección.

La caracterización de los usos del suelo mediante la teledetección, permite su posterior empleo en un modelo hidrológico de Témex de resolución temporal mensual de acuerdo a las necesidades del modelo, utilizando de esta forma información a la medida.

Finalmente, al caracterizar e identificar los tipos de cultivos existentes y la infiltración que se produce en ellos, este estudio, puede convertirse en punto de partida para futuros proyectos, en los que uno de sus objetivos sea la simulación de transferencia de nitratos al flujo subsuperficial en el entorno del Campo de Cartagena.

Los objetivos específicos de este proyecto son los siguientes:

1. Monitorizar y clasificar los usos del suelo del entorno del Campo de Cartagena desde octubre de 2017 hasta septiembre de 2018 mediante el empleo de la teledetección conforme a las necesidades del modelo hidrológico adoptado.
2. Implementar mediante Sistemas de Información Geográfica un modelo hidrológico de Témex.
3. Modelizar a partir del modelo hidrológico empleado, la infiltración que se produce en una zona en la que existen aprovechamientos agrícolas intensivos a lo largo de un año hidrológico, para que, en estudios posteriores, se pueda estimar la transferencia de nitratos hacia el flujo subsuperficial.

Con la consecución de los anteriores objetivos, indirectamente se puede lograr estimar el balance hídrico del suelo y el valor de la recarga que se produce en el acuífero del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena. Además, en base a los resultados obtenidos y su comparativa con otros estudios, se podrá realizar una valoración sobre la aptitud del empleo de un modelo hidrológico de paso temporal mensual, en zonas donde las precipitaciones anuales se concentran en unos pocos días.

Para la consecución de los objetivos fijados, ha sido necesario adquirir y desarrollar nuevos conocimientos, además de profundizar aptitudes en el empleo de software específico. Entre estos objetivos más generales, se encuentran los siguientes:

- Adquirir y desarrollar conocimientos de la estructura agraria en el entorno del Campo de Cartagena.
- Conocer los diferentes métodos de clasificación de imágenes satélite existentes y los procedimientos para mejorar y evaluar la bondad de la clasificación realizada.
- Profundizar en el empleo de sistemas de información geográfica para el tratamiento digital de las imágenes y su aplicación en modelos hidrológicos.

- Ampliar los conocimientos sobre modelos hidrológicos, en concreto el empleo de un modelo de Témez.
- Interpretar los resultados y analizar la coherencia de los datos obtenidos conforme a publicaciones de simulación hidrológica realizadas por entidades gubernamentales en la zona de estudio.

1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

El Trabajo Fin de Máster se ha estructurado de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Politécnica de Cartagena.

- **Capítulo 1, Introducción.** En este apartado, se ha justificado la realización del presente proyecto, estableciéndose la fuente de conocimiento a través de una exhausta revisión bibliográfica realizada en el apartado de antecedentes. Además, se han definido los objetivos que se pretenden alcanzar y la estructura del proyecto.
- Descripción del modelo hidrológico de Témez. Recopilación de trabajos en los que se emplea. Ecuaciones que definen el modelo y descripción de los parámetros que se requieren. **Capítulo 2.**
- Clasificación de imágenes satélite. Descripción del tratamiento digital previo a la clasificación. Clasificación supervisada y clasificación no supervisada y métodos con los que evaluar la bondad de la clasificación. **Capítulo 3.**
- Definición y descripción de la zona de estudio. Evolución económica y demográfica, caracterización de los modelos de cultivos, caracterización hidrológica y problemática ambiental. Definición de las principales figuras de protección existentes y conexión con el entorno. **Capítulo 4.**

Material empleado:

Descrito en profundidad en el **Capítulo 5**, en este apartado se realiza un inventario de los diferentes materiales que se han requerido para la elaboración de este trabajo, además de especificar los diferentes software que se han empleado. A continuación, se nombran aquellos que han resultado de mayor relevancia para el desarrollo del proyecto.

- Obtención de veinticuatro imágenes satélite procedentes de la misión espacial Sentinel-2, descargadas desde el portal Open Access Hub.
- Empleo de fuentes de información geográfica como el SIOSE, el CLC, o el catastro, además de ortofotos aéreas de máxima resolución de la región de estudio.
- Recopilación de series meteorológicas de estaciones ubicadas en la zona de estudio y datos de riego orientativo para los diferentes cultivos identificados en la zona, proporcionados por el SIAM IMIDA.
- Recopilación del resto de variables requeridas por el modelo de Témez, como son la litología, el coeficiente de rescisión del acuífero y un modelo de elevación del territorio.
- Empleo de software específico para el tratamiento digital de las imágenes satélite como es SNAP y ArcGIS para la clasificación de las imágenes y posterior implementación del modelo hidrológico.

Metodología:

Descrita en el **Capítulo 6**, la metodología empleada se divide principalmente en dos apartados.

El primero, nombrado como clasificación de los usos del suelo, se encuentra destinado a mostrar explícitamente la metodología empleada para obtener la clasificación de las imágenes. Por ello, este apartado se compone de una breve introducción al proyecto espacial del que se obtienen las imágenes, los pasos seguidos para la descarga de las mismas y el tratamiento digital realizado previo a la clasificación. A continuación, se explica el procedimiento con el que extraer

la región de estudio y facilitar el proceso de clasificación. Por último, se detalla el procedimiento seguido para la determinación de las regiones de entrenamiento, la clasificación de la imagen, el método de post clasificación para una mejora del resultado obtenido y la manera en la que se determina la bondad de la clasificación y se otorga validez a la clasificación mediante la elaboración de matrices de confusión.

El segundo apartado dentro del capítulo dedicado a la metodología está destinado al modelo hidrológico empleado. Para la implementación del modelo en GIS, se requiere en primer lugar, de la confección de mapas con la extensión de la zona de estudio con las diferentes variables. Hay mapas que varían temporalmente, como es por ejemplo el de usos del suelo y las variables meteorológicas; sin embargo, otros se mantienen constantes a lo largo del periodo de simulación, como es el caso de la litología o el coeficiente de rescisión del acuífero. Para el desarrollo del modelo en un sistema de información geográfica, hay que tener presentes las anteriores consideraciones. A continuación, las ecuaciones que definen el modelo de Témez se escriben para poder ser empleados en la herramienta Raster Calculator. Finalmente, se muestra un diagrama realizado con la herramienta Model Builder, con la que poder automatizar el proceso.

Análisis y resultados:

Para los resultados y el análisis de los mismos, se destina el **Capítulo 7**. En este capítulo se comentan los resultados obtenidos, partiendo en primer lugar de la clasificación de las imágenes satélite. A partir de la clasificación realizada, se determina la bondad de la misma mediante el análisis de las matrices de confusión. Además, la clasificación otorga información del uso del suelo de forma mensual. Como el estudio se inicia con el análisis de veinticuatro imágenes satélite dispuestas en orden cronológico, se logra describir la evolución de los usos durante el periodo de estudio.

A partir de la implementación del modelo de Témez, se obtienen resultados que caracterizan hidrológicamente la zona de estudio. Entre ellos, la determinación de los valores de infiltración en las zonas de cultivo, así como la obtención del

balance hídrico del suelo. Finalmente, se realiza una discusión de los resultados, comparando los valores obtenidos en este Trabajo Fin de Máster, con los de otros estudios hidrológicos realizados en la zona de estudio.

Conclusiones, bibliografía y anejos:

En el **Capítulo 8**, se muestran las conclusiones que se obtienen al realizar el estudio. Hay que destacar que existen dos tipos de conclusiones:

1. Las derivadas de realizar una clasificación supervisada de la zona de estudio. Entre estas conclusiones, se valora la evolución de los cultivos, así como la posibilidad de identificar cultivos intensivos que se encuentren fuera de las zonas establecidas como de regadío.
2. Las obtenidas por el desarrollo del modelo de Témez. Entre estas conclusiones, destaca la aptitud o no aptitud de un modelo de paso mensual en zonas en que los días de precipitación anuales son muy reducidos como es el caso de la zona del Sur-Este peninsular. Además, se concluye con la posibilidad de extender la metodología aplicada para realizar una valoración del global de las aportaciones que se producen al acuífero cuaternario del Campo de Cartagena.

Finalmente, en el **Capítulo 9** se muestran todas las referencias empleadas para la elaboración del proyecto y en el **Capítulo 10** se ofrecen los anejos del proyecto.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DE TÉMEZ

2.1. JUSTIFICACIÓN DE ELECCIÓN DEL MODELO

El modelo hidrológico de Témez (Témez, 1977) ha sido ampliamente utilizado en el territorio español para la evaluación de los recursos hídricos. Este hecho, hace que su utilización resulte interesante, dado que se trata de un modelo que ha sido probado y ratificado en innumerables ocasiones. Además, el reducido número de variables de entrada que se requieren, hacen que el modelo sea especialmente útil para su aplicación en zonas que no se encuentran especialmente bien caracterizadas o bien de las que no se pueda disponer de información. Resalta también su facilidad para ser integrado en software informáticos dado al reducido número de parámetros requeridos, reproduciendo igualmente los principales procesos que tienen lugar en el ciclo hidrológico mostrados en la (Imagen 1).

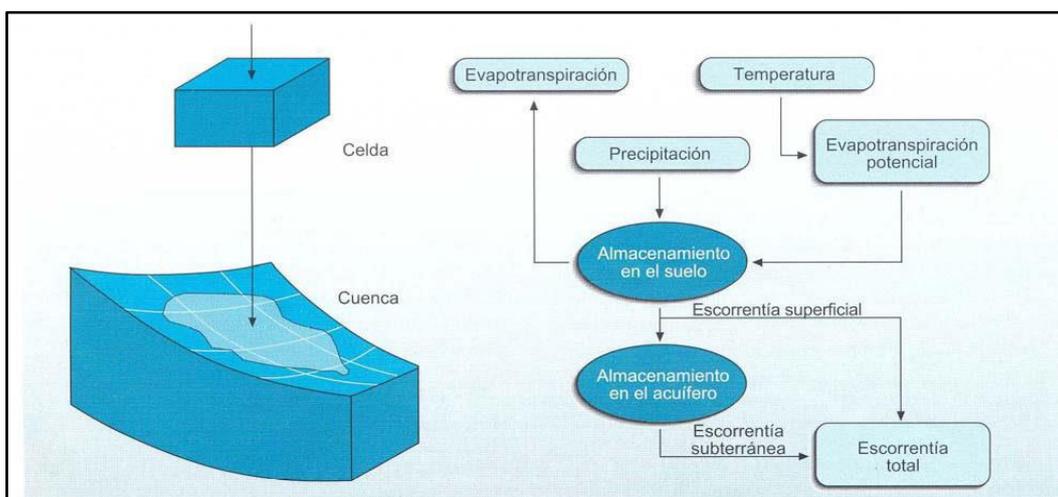


Imagen 1. Procesos que tienen lugar en el ciclo hidrológico. Fuente: Libro Blanco del Agua.

Un modelo de tipo Témez, resulta sencillo de implementar en Excel. En contra partida, este modelo requiere del empleo de parámetros de entrada que se encuentren definidos dentro de una horquilla muy estricta, puesto que, de no ser así, se incurre en el riesgo de obtener valores de acuerdo a la realidad del modelo, pero alejados de la realidad hidrológica de la zona de estudio. (Murillo, J. M. y Navarro, J. A., 2011.)

Se trata de la integración de los modelos hidrológicos en los códigos de programación, un paso fundamental para facilitar la modelización y simulación de las aportaciones hidrológicas que se producen en una región. Como se ha comentado anteriormente, según el modelo hidrológico empleado, se requiere de un número determinado de datos de entrada. De acuerdo a un número creciente de variables de entrada, los diferentes modelos se clasifican de la siguiente manera (Estrela, T., 1992):

- Modelos que requieren entre dos y seis datos de entrada: Permiten realizar una simulación hidrológica de escala temporal mensual.
- Modelos que permiten realizar una simulación agregada a escala temporal mensual o diaria. Requieren como máximo de veinticinco parámetros de entrada.
- Modelos que realizan simulaciones del tipo distribuido, tanto de forma espacial como temporal. Requieren de una gran cantidad de datos de entrada, por lo que, solamente se emplean en estudios hidrológicos detallados de una zona concreta. Dada la gran cantidad de datos que requieren, normalmente el acceso a la mayoría de ellos se realiza mediante pago.

Como se ha expuesto, existe una gran variedad de modelos y el uso de cada uno, se justifica de acuerdo a la finalidad del estudio. Después de las anteriores alusiones, se puede llegar a la conclusión de que un modelo hidrológico con un mayor número de variables de entrada, implica un mayor acierto en la simulación. Sin embargo, dependiendo de las necesidades del proyecto, existen ocasiones en las que un modelo relativamente sencillo de implementar, ofrece

resultados acertados. A continuación, se citan diferentes estudios que justifican la anterior afirmación.

1. Según Estrela en su estudio ***Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos***, un modelo de Témez, resulta especialmente adecuado para reproducir el comportamiento de un sistema hidrológico dado que simula de una manera suficientemente precisa la componente correspondiente al flujo subterráneo. Además, el hecho de incorporar un mayor número de variables que las estrictamente necesarias, puede entorpecer un posterior ejercicio de calibración.
2. Los modelos que emplean un mayor número de datos de entrada, aunque parezcan a primera vista que sean los que vayan a ofrecer unos resultados de mayor precisión, en la práctica esto no siempre ocurre, debido a la dificultad de obtener todos los parámetros requeridos y la veracidad de los mismos. (Tapia, F.O. y Mora, F.E., 2004).
3. El empleo de un modelo hidrológico simplificado, no significa que los resultados obtenidos vayan a tener una menor veracidad o certeza, sino que, como en el empleo de todos los modelos, hay que tener claro el ámbito y las restricciones a las que se encuentra sujeto. (Delgado Moya, S. y López García, L.,1983).
4. Para determinar la infiltración que se produce en una zona hacia el acuífero, no es siempre necesario, o factible, emplear modelos con un elevado número de variables, ya que su empleo puede no resultar viable. (Sahuquillo Herraiz, A., 1993).

Tal y como se menciona en el Libro Blanco, se han desarrollado en las últimas décadas nuevos modelos que tratan de simular con gran precisión las características hidrológicas de una cuenca. Estos modelos planteados desde fundamentos puramente teóricos, requieren, como mínimo de información meteorológica y de información relativa a las características morfológicas de la cuenca. Entre los modelos desarrollados desde fundamentos teóricos, destaca el Systeme Hydrologique Europeen (SHE), (Abbott *et al.*, 1986), que al derivar

de las ecuaciones diferenciales que rigen los procesos físicos del ciclo hidrológico, solamente se ha podido implementar en pequeñas cuencas tras un proceso complejo. En conclusión, es importante entender el ámbito de uso de los diferentes modelos, así como su resolución temporal, evitando a toda costa realizar una parametrización excesiva de los mismos, dado el aumento de dificultad o imposibilidad de implementación de estos.

Una de las aplicaciones para las que se utiliza el modelo, es la de realizar valoraciones globales de una cuenca hidrológica, empleando los valores medios característicos que definen la cuenca. En estos casos, para modelizar el comportamiento de la cuenca de una forma adecuada, esta no puede ser de una gran extensión. Para la aplicación del modelo en cuencas de gran tamaño, es necesario realizar subdivisiones de la misma, concretado pequeñas parcelas, en las que las características edafológicas, litológicas y climáticas sean iguales o parecidas, haciendo trabajar el modelo de una manera desagregada.

Estas subdivisiones se denominan como unidades de respuesta hidrológica (HRUs) y son áreas de una cuenca que cuentan con homogeneidades en lo que se refiere a respuesta hidrológica y características climáticas. Estas homogeneidades no hacen referencia de proximidad, sino que, por el contrario, se pueden encontrar unidades de respuesta hidrológica similares a gran distancia entre sí, dado que estas zonas comparten propiedades comunes que son de especial importancia para realizar simulaciones hidrológicas, como son la pendiente, elevación del terreno, tipo de suelo, densidad de la cubierta vegetal etc. (Conesa-Celdrán, Joaquín. 2017)

A la vista de los anteriores razonamientos, para la realización de este proyecto se ha elegido el modelo de Témez, dado que realiza una simulación hidrológica adecuada a las necesidades del proyecto mediante la aplicación de nueve ecuaciones que pueden ser implementadas en los sistemas de información geográfica y que simulan el comportamiento hidrológico de la zona de estudio. Además, requiere de un número limitado de variables de entrada, lo que posibilita disponer de la información requerida con una mayor facilidad frente al empleo de modelos con un mayor número de parámetros.

2.2. ECUACIONES QUE RIGEN EL MODELO

Los principios del modelo se rigen bajo las leyes de continuidad y de conservación de masa en los distintos procesos de transporte de agua que ocurren en las diferentes fases que componen el ciclo hidrológico. Normalmente, el modelo de Témez se encuentra empleado con una resolución temporal de un mes. Sin embargo, debido a que el desarrollo teórico del modelo es de índole general, este puede ser empleado en otros espacios temporales, tanto con una periodicidad horaria, diaria o anual, siempre y cuando, se compruebe que los resultados proporcionados resulten coherentes a la realidad física del sistema hidrológico que se pretende simular. (Paredes-Arquilo, Javier. *et al.*, 2017).

Una de las consideraciones que realiza el modelo es la de dividir el terreno en dos zonas. Una zona superior en la que agua y aire coexisten y otra inferior, que a efectos de simulación se considera acuífero completamente saturado, sobre la cual drena la zona superior. El balance de masas del modelo se consigue a través de flujos intermedios, de entrada y de salida, todos ellos mostrados en la Imagen 2.

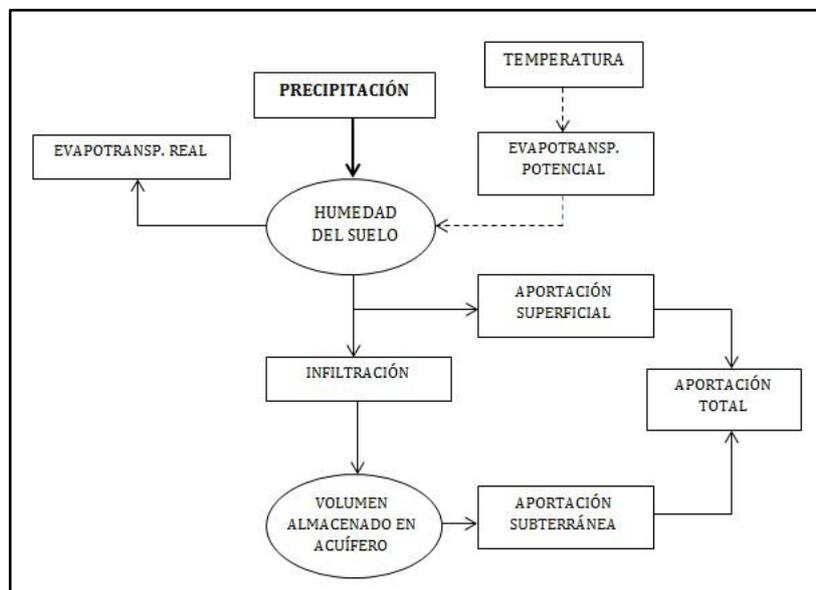


Imagen 2. Diagrama de flujo del modelo hidrológico de Témez. Fuente: Potenciano de las Heras, A. y Villaverde Valero, J.J.; 2009

- Al analizar los elementos que componen los diferentes flujos, se determina que las entradas al sistema corresponden únicamente a la aportación realizada por la precipitación (P).
- Los flujos de salida, se corresponden a la evapotranspiración real (E), la aportación superficial (A_{sup}) y por último a la aportación subterránea (A_{sub}). De acuerdo al balance de masas, la suma de las variables de salida, es igual a la de entrada.
- Flujo intermedio. Se define como infiltración (I). Se trata de la cantidad de agua que pasa de la zona superior del suelo hasta el reservorio inferior. Se trata, por lo tanto, de la cuantificación de la recarga (R) que se produce al acuífero, y según el paso temporal del modelo, los valores son diarios, mensuales o anuales.

Los diferentes flujos definidos anteriormente, están interconectados entre sí a partir de dos depósitos. El depósito suelo superficial, desde el que parte el flujo de infiltración y escorrentía superficial y el depósito acuífero.

A grandes rasgos, el funcionamiento del modelo es el siguiente: El aporte proviene de la variable precipitación. Al valor de precipitación asignado, se le resta la evapotranspiración real. Una vez se ha realizado la resta, pueden darse dos situaciones:

1. Que la evapotranspiración real sea igual que el aporte. En este caso, no se produce ningún tipo de excedente.
2. Que la precipitación sea superior a la evapotranspiración real, lo que significa que se produce un excedente que se incorpora en el depósito suelo, en forma de humedad. El excedente que resulta, es función de la precipitación (P), del déficit de humedad en el suelo ($H_{max}-H_{i-1}$) y de la evapotranspiración potencial, expresándose en las ecuaciones 1, 2, 3 y 4, descritas a continuación:

$$P_i \leq P_o; T_i = 0 \quad \text{Ec. 1}$$

$$P_i > P_o; T_i = \frac{(P - P_o)^2}{P + \delta - 2 * P_o} \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

$$\delta = H_{max} - H_{i-1} + EP_i \quad \text{Ec. 3}$$

$$P_o = C * (H_{max} - H_{i-1}) \quad \text{Ec. 4}$$

Significando cada variable:

P_i = Precipitación en el mes i expresado en (mm).

T_i = Excedente que se produce en el mes i expresado en (mm).

H_{max} = Capacidad de almacenamiento de agua máxima del suelo en (mm).

H_{i-1} = Almacenamiento de agua en el suelo en el mes anterior al evaluado (mm).

EP_i = Evapotranspiración potencial del mes i (mm).

δ = Déficit hídrico (mm)

C = Parámetro de excedente.

El almacenamiento de agua en el suelo (H_i) y la evapotranspiración real (E_i), en cada punto de evaluación se calculan a partir de las ecuaciones 5 y 6.

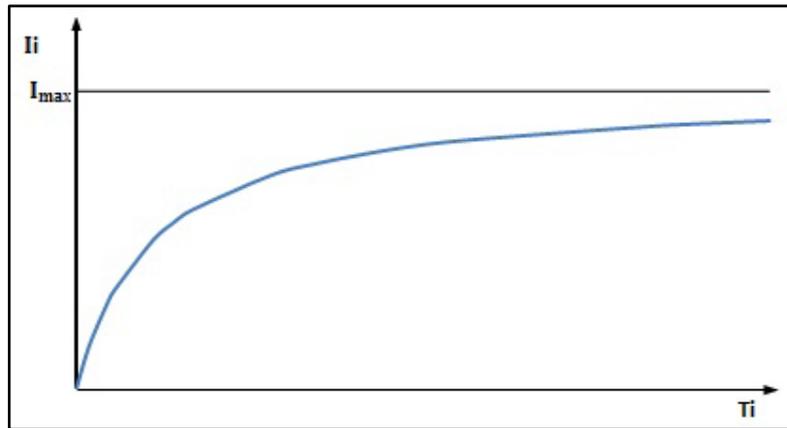
$$H_i = \max (0, -H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i) \quad \text{Ec. 5}$$

$$E_i = \min (H_{i-1} + P_i - T_i, EP_i) \quad \text{Ec. 6}$$

La infiltración (I_i) que se produce hacia el subsuelo, está en función del excedente (T_i) y de la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse desde el terreno hasta el subsuelo de manera mensual, representado por el parámetro (I_{max}). La relación entre las variables se expresa en la Ec.7.

$$I_i = I_{max} * \frac{T_i}{T_i + I_{max}} \quad \text{Ec. 7}$$

Según la lectura de la ecuación 7, la infiltración (I_i) que se produce, crece de manera asintótica horizontal conforme aumenta el excedente, sin llegar nunca a alcanzar el valor de infiltración máxima (I_{max}) que se ha definido en los datos de entrada del modelo. Esta relación se observa en la Gráfica 1. Según el modelo, la totalidad de la infiltración va a parar al acuífero, por lo que hablar de infiltración (I_i), es equivalente a hablar de recarga del acuífero (R).



Gráfica 1. Evolución de la infiltración respecto al excedente registrado. Fuente: Manual Técnico EvalHid.

En la última etapa de simulación, el modelo trabaja de manera agregada, planteando que el comportamiento del acuífero sea de forma unicelular. Para modelizar la descarga del acuífero, se emplea la curva de agotamiento característica de un manantial, mostrada en la Ec.8.

$$Q_t = \alpha * V_t \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde α se trata del coeficiente de agotamiento, es decir una constante característica de cada sistema acuífero;

Q_t representa el caudal que fluye desde el acuífero hasta la red superficial;

V_t se trata del volumen almacenado en el acuífero durante el periodo.

Para el cálculo del volumen del acuífero (V_t), se emplea una ecuación diferencial, de manera que se establece que el flujo de entrada (I_t) menos el caudal de salida (Q_t) es igual a la variación de volumen en el periodo de evaluación, en este caso representado por t . La ecuación diferencial definida corresponde a la Ec.9.

$$I_t - Q_t = \frac{dV_t}{dt} \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde I_t corresponde a la recarga en el periodo de tiempo.

Q_t es el caudal de salida del acuífero en el periodo de tiempo de evaluación.

$\frac{dV_t}{dt}$ se trata de la variación de volumen en el acuífero respecto al tiempo.

Como se muestra en la Ec.8, la descarga del acuífero (Q_t) es función del coeficiente de descarga del acuífero y el volumen del mismo. De esta forma, se sustituye en la Ec.9, planteando la Ec.10, mostrada a continuación:

$$I_t - \alpha * V_t = \frac{dV_t}{dt} \quad \text{Ec. 10}$$

Finalmente, se deriva la Ec.10, obteniéndose la Ec.11, que se expone de una forma más comprensiva en la Ec.12, que representan el volumen total almacenado en el acuífero en un momento determinado:

$$V_t = V_0 * e^{-\alpha t} + \frac{I}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad \text{Ec. 11}$$

$$V_t = V_{t-1} - V_{t-1} * e^{-\alpha t} * I_t \frac{(1 - e^{-\alpha t})}{\alpha} \quad \text{Ec. 12}$$

A partir del balance de masas, se deduce la Ec.13, que cuantifica la escorrentía subterránea (A_{SUB}) en el periodo de evaluación.

$$A_{SUB} = V_{i-1} - V_i + I_i \quad \text{Ec. 13}$$

Por su parte, la escorrentía superficial (A_{SUP}), se produce a partir del excedente que no se infiltra, tal y como se muestra en la Ec.14.

$$T_i - I_i = A_{SUP} \quad \text{Ec. 14}$$

La suma de la escorrentía superficial y la escorrentía subterránea dan como resultado las aportaciones totales que se producen en el sistema evaluado, mostrado en la Ec.15.

$$A_{TOT} = A_{SUP} + A_{SUB} \quad Ec.15$$

Entre las limitaciones que se encuentran en el modelo de Témez, es que este no permite evaluar correctamente las interacciones que se producen en los cauces perdedores, puesto que se produce una recarga del acuífero que no se encuentra simulada en el modelo. Este hecho provoca, que, en el caso de querer evaluar una cuenca con elevado detalle en la que transcurra un cauce perdedor, se hayan de proponer ecuaciones externas al modelo que simulen la interacción. Otra consideración a tener en cuenta, es que el modelo está propuesto para evaluar los recursos hídricos y las interacciones entre los diferentes componentes del sistema, no para realizar simulaciones piezométricas detalladas. En este caso, es necesario recurrir a otros métodos. (Estrela Monreal, T., Calvo Rubio, F.C., Estrada Lorenzo, F., 1999).

2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS REQUERIDOS

Una vez se ha analizado el comportamiento del modelo, se está en disposición de identificar cuáles son los elementos que se requieren para que los resultados obtenidos sean veraces y lo más aproximados a la realidad de la cuenca de estudio. Los parámetros que se requieren se describen en los siguientes apartados.

2.3.1. Variables meteorológicas:

Para el correcto funcionamiento del modelo, se requieren de series de precipitación (P) y temperatura (T), con la que poder determinar la evapotranspiración potencial (ET_p) en la zona de estudio. Los registros obtenidos pueden ser diarios, mensuales o anuales, según el paso temporal que se decida aplicar en el estudio.

Uno de los incisos que se consideran oportunos realizar en este apartado, consiste en especificar con un mayor detalle lo que se considera como evapotranspiración potencial (ET_p). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO), el empleo del término evapotranspiración potencial (ET_p) es incorrecto e induce a confusión al lector, debiendo ser sustituido por evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o).

La ET_o , calculada mediante la ecuación de Penman-Moneith, corresponde a la tasa de evaporación que ocurre en una superficie de referencia sin restricciones de agua. A efectos de consideración, esta superficie corresponde a un hipotético cultivo de pasto con una altura de doce centímetros, altura uniforme, con un crecimiento vegetativo activo y que da sombra al suelo por completo. El albedo determinado es de 0,23 y la resistencia superficial fija de 70s/m. (Martínez Núñez, L., et. Al. 2015).

Respecto a la fase de recolección de las variables meteorológicas que inciden en el modelo, habitualmente se encuentra la dificultad de que en la zona en la que se pretende aplicar el modelo hidrológico, no exista una densidad suficiente de estaciones meteorológicas que permitan realizar una interpolación representativa de la extensión de territorio a analizar. Además, en caso de existir una red de observación meteorológica lo suficientemente bien mallada, es usual detectar que las series de observación son relativamente cortas o que existan registros faltantes. En estos casos, es indispensable recurrir a métodos autorregresivos, con los que poder completar las series de observación manteniendo la varianza de la serie.

Finalmente, en las zonas en las que se encuentren elevadas cordilleras, es usual la falta de estaciones de observación en las cumbres de estas, lo que propicia a la falta de precisión en el modelo, puesto que las precipitaciones aumentan y las temperaturas descienden con una mayor altura, propiciando una simulación con unos aportes hídricos menores a los que se dan realmente. Uno de los métodos empleados para solventar este problema, consiste en el cruce de información entre modelos de elevación del terreno y las estaciones meteorológicas, permitiendo desarrollar una ecuación que modelice el aumento de la

precipitación y el descenso de la temperatura conforme a un determinado aumento de altitud.

En conclusión, los datos de entrada correspondientes a las variables meteorológicas, dependen en gran medida de las limitaciones de las estaciones meteorológicas distribuidas de la zona de estudio, afectando a los datos que se emplean en el proyecto, tanto la densidad y distribución espacial de la red como la temporalidad de recogida de datos y la duración de las series de registros.

2.3.2. Litología y edafología de la región:

En el modelo de Témez, la infiltración (I_i) que se produce hacia el subsuelo, está en función del excedente (T_i) y de la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse desde el terreno hasta el subsuelo de manera mensual. Esta cantidad máxima de infiltración en milímetros por metro cuadrado (mm/m^2) se representa en el modelo por el parámetro (I_{max}).

Identificar la litología y edafología de la zona de estudio, resulta de especial interés para evaluar la infiltración y la escorrentía. La infiltración corresponde a la entrada de agua en un perfil de suelo de la superficie. En los instantes iniciales de la precipitación, en un mismo suelo la infiltración alcanza los valores máximos. Conforme continúa la precipitación y aumenta la humedad del suelo, la infiltración se reduce, hasta llegar al punto de saturación del suelo, en el cual el valor que adquiere la infiltración corresponde al de la conductividad hidráulica del suelo saturado. La infiltración en un perfil de suelo corresponde, por lo tanto, a la diferencia entre la cantidad de lluvia y cantidad de escorrentía superficial. (Conesa Celdrán, Joaquín. 2017)

El movimiento del agua y en general de líquidos en el suelo, se produce a través de los poros que conforman la estructura de este. La infiltración, permite cuantificar la cantidad de agua que penetra por los poros del suelo, en un tiempo y condiciones determinadas. Los suelos conformados por partículas gruesas, como las gravas y las arenas, permiten que la tasa de infiltración sea elevada debido a que tienen un mayor porcentaje de poros en su estructura. Sin embargo, aquellos suelos conformados por partículas finas, como lo son los arcillosos,

tienen una infiltración reducida, puesto que la porosidad el suelo es menor. La infiltración no se trata de un parámetro que se mantenga constante a lo largo del tiempo, sino que varía con la humedad del suelo. Un suelo con una elevada humedad, tiene un menor porcentaje de poros disponibles para permitir el nuevo acceso de agua a su estructura y por lo tanto, la infiltración se reduce frente aquellos perfiles que a igual composición tienen una reducida humedad. Entre los factores que afectan a la infiltración cabe detallar los siguientes:

- La composición del suelo: El tamaño de las partículas que componen el perfil y su cohesión, influyen en los valores de infiltración, siendo estos mayores al aumentar el tamaño de grano y disminuir la cohesión.
- Humedad: El valor de la infiltración tiene un comportamiento inverso al de la humedad. A mayor humedad del suelo, se produce una menor infiltración.
- Presencia de vegetación: La existencia de vegetación, protege el suelo del impacto directo de las gotas de lluvia, evitando la compactación del mismo. Además, esta dificulta la escorrentía, al permitir retener un porcentaje de la precipitación en las hojas. Finalmente, la vegetación a través de las raíces, permite un drenaje más eficaz reduciendo de esta forma la humedad y propiciando que en futuros eventos de precipitación se incremente la infiltración al disponer el suelo de una menor humedad.
- Acción del hombre: El uso de un suelo dado, define en gran manera la infiltración. Así pues, en zonas pavimentadas o compactadas, la infiltración se reduce de manera considerable frente aquellas zonas que preservan un perfil original, no modificado.

A la vista de los factores que inciden en la evaluación de la capacidad de infiltración, resulta complejo asignar un valor concreto para cada tipo de suelo, siendo necesario recurrir a métodos en los que se evalúe el parámetro de infiltración de una manera más general. Los valores que se asignan a la componente de infiltración (I_{max}) en el Libro Blanco del Agua en España, están obtenidos a partir de los datos de flujo base en las estaciones de aforo de los

ríos y la calibración posterior del modelo. Con esta metodología, se permite relacionar la litología predominante de la zona con la infiltración y, por lo tanto, obtener una estimación para el valor (I_{max}). (Teodoro Estrela Monreal, Francisco Cabezas Calvo-Rubio y Federico Estrada Lorenzo, 1999)

En la zona de estudio que abarca este proyecto, solamente existen cuencas que transportan agua de forma estacional, coincidiendo con episodios intensos de precipitación, no existiendo, por lo tanto, un gran curso de agua con aforos, que permita realizar una evaluación concreta del parámetro de infiltración. Así pues, para la realización de este estudio, se adopta para la litología de la zona de estudio, los valores que se fijaron en la evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco, representados en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores representativos de infiltración máxima (mm/m²) en un periodo mensual, para las diferentes litologías. Elaboración propia. Fuente: LA EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL LIBRO BLANCO DEL AGUA EN ESPAÑA.

<i>LITOLOGÍA</i>	<i>CAPACIDAD MÁXIMA DE INFILTRACIÓN (I_{max})</i>
<i>Mat. aluvial de origen indiferenciado</i>	400
<i>Calizas y dolomías</i>	1000
<i>Margas</i>	85
<i>Margas yesíferas</i>	75
<i>Yesos</i>	64
<i>Materiales arenosos</i>	450
<i>Materiales gravo-arenosos</i>	500
<i>Calcarenitas</i>	250
<i>Arcosas</i>	150
<i>Ranas</i>	95
<i>Granitos</i>	65
<i>Rocas metamórficas</i>	20
<i>Gneises</i>	55
<i>Pizarras</i>	40
<i>Rocas volcánicas</i>	275

2.3.3. Usos del suelo:

El modelo de Témez, define el suelo como un depósito, en el que se puede acumular el agua proveniente de la precipitación que posteriormente, puede ser evapotranspirada, infiltrada o bien formar parte de la escorrentía superficial. Tal y como se ha descrito en el apartado referente a la litología y edafología, existen diferentes factores que influyen en la capacidad de un suelo para retener e igualmente, infiltrar agua hacia capas subsuperficiales. La capacidad de retención de humedad de un suelo, definida en el modelo de Témez como (H_{max}), depende principalmente de las características físicas de este y la vegetación que lo cubre. (Paredes Arquiola, et. Al, 2017).

Para la evaluación de los recursos hídricos, en el Libro Blanco del Agua, se regionaliza la capacidad máxima de humedad del suelo de acuerdo al uso, expresada en milímetros de agua por metro cuadrado, mostrándose los valores que asignados en la Tabla 2.

Tabla 2. Regionalización de la capacidad máxima de humedad según el uso del suelo. Fuente: LA EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL LIBRO BLANCO DEL AGUA EN ESPAÑA.

USO DEL SUELO	CAPACIDAD MÁXIMA DE HUMEDAD (H_{max})
<i>Superficies artificiales</i>	40
<i>Espacios con poca vegetación</i>	100
<i>Tierras de labor en secano</i>	155
<i>Tierras de labor en regadío</i>	215
<i>Praderas y pastizales naturales</i>	150
<i>Sistemas agrícolas heterogéneos</i>	195
<i>Cultivos permanentes</i>	210
<i>Vegetación arbustiva</i>	135
<i>Bosque mixto</i>	220
<i>Bosques de frondosas y coníferas</i>	230
<i>Zonas húmedas y superficies de aguas artificiales</i>	300

Así pues, para definir la capacidad de retención de humedad que tiene un suelo, es preciso definir previamente su uso. Actualmente, en la mayoría de estudios hidrológicos que se realizan, la información sobre los usos del suelo, se obtiene a partir de información ofrecida por organismos gubernamentales. Entre las principales virtudes de este método, frente a la elaboración propia, radica en la facilidad de adquisición de los datos, no siendo necesario invertir tiempo, además de tratarse de un origen contrastado en la que la información que se ofrece es correcta. Entre los diferentes programas que ofrecen información sobre los usos del suelo, destacan el SIOSE y el CORINE LAND COVER.

Sin embargo, el hecho de emplear información predefinida, conlleva los siguientes riesgos y desventajas:

1. Al tratarse de un producto genérico, las características pueden no ajustarse a las necesidades del proyecto, provocando que el proyecto tenga que adaptarse al producto obtenido o se deban de modificar los objetivos fijados inicialmente.
2. Las principales fuentes que ofrecen información sobre los usos del suelo, suelen actualizarse cada cierto tiempo, concretamente, cada dos o tres años, lo que conlleva emplear información que no se encuentra completamente actualizada.
3. Al realizar la clasificación de los usos del suelo de forma anual, resulta una tarea ardua evaluar de una forma complaciente los cultivos de una zona determinada. En aquellas zonas en las que se encuentran cultivos rotativos, las leyendas son representadas como “cultivos heterogéneos o cultivos irrigados” sin lograr el detalle de determinar las épocas del año en las que hay siembra o aquellas zonas en las que el campo se encuentra en barbecho.
4. Un determinado uso del suelo, solamente se representa a partir de una extensión continua mínima, por lo que inevitablemente los productos ofrecidos pierden detalle ganando en homogeneidad.

A pesar de las anteriores afirmaciones, los programas de observación que ofrecen datos sobre la ocupación de los suelos, son realmente útiles una vez se conocen sus limitaciones, además de ser ampliamente utilizados hoy en día. A continuación, se ofrece información detallada sobre los principales programas que existen en la actualidad.

CORINE Land Cover:

El programa de Coordinación e información del entorno (CORINE) por sus siglas en inglés, se trata de un programa financiado por la Comisión Europea que persigue los siguientes objetivos:

- Recopilar información sobre el estado del medio ambiente, con especial atención a aquellos aspectos que puedan ser prioritarios para los estados miembros.
- Coordinar la recopilación y organización de la información entre los estados miembros o agencias internacionales.
- Asegurarse de entregar una información veraz y compatible a lo largo del tiempo.

La definición de los usos del suelo, es parte del programa CORINE, y pretende proveer de información geográfica consistente a los doce estados que conforman la comunidad europea. El proyecto se entiende como necesario, dado que, en las primeras etapas del mismo, se alertó que la información sobre los usos del suelo, junto al relieve y los cursos drenantes, resultan esenciales para el manejo del entorno, siendo la información que se proporciona en CORINE empleada en numerosos estudios. Además, previamente al establecimiento del programa, la información disponible sobre los usos del suelo, se encontraba fragmentada entre los diferentes países que conforman la Unión Europea y adaptada por lo tanto a la nomenclatura de cada país miembro, dificultando de esta manera, la difusión de la información entre estados. Con el programa CORINE se ha logrado obtener una base de datos homogénea, que permite entre otros, evaluar los cambios que suceden en el entorno a lo largo de un periodo de tiempo.

La actualización de la información que se emplea tiene lugar en un periodo de entre cinco a diez años, aunque se están llevando a cabo estudios en la actualidad, para reducir este periodo y lograr actualizar la base de datos de manera continua. La última actualización del programa se ha realizado el año 2018, siendo la escala de referencia 1:100000. En la Imagen 3, se muestra la visualización de la clasificación de los usos del suelo en el sur-este peninsular mediante el visor web que ofrece la unión europea.

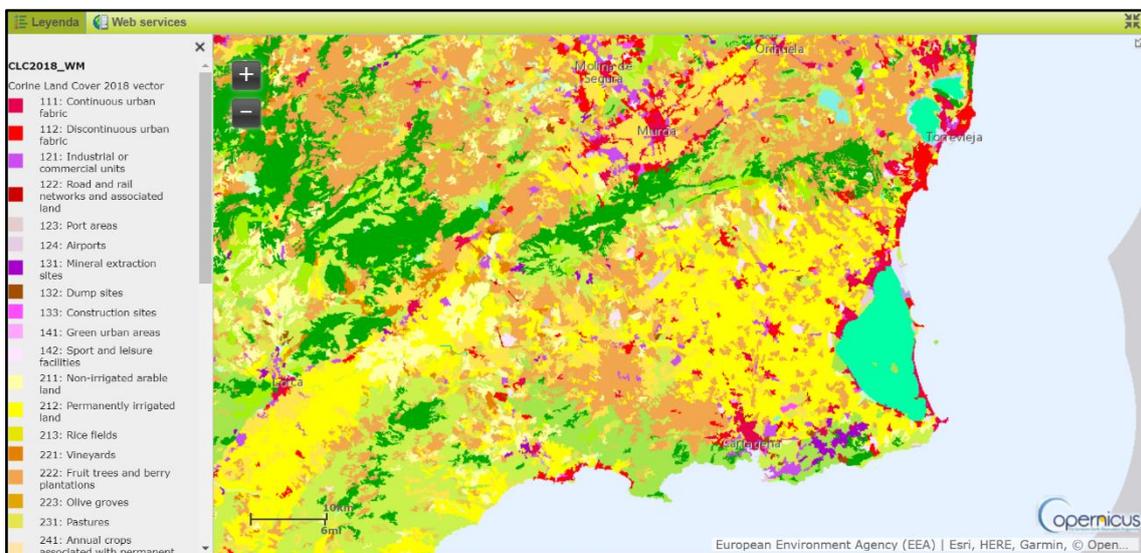


Imagen 3. Muestra de la clasificación de los usos del suelo mediante el programa CORINE en la región del Sur-Este peninsular. Fuente: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>

La información que utilizaba el programa en sus inicios para lograr realizar la clasificación de los suelos, provenía de las misiones satélite de observación Landsat y Spot, y mediante la combinación de ambas, se lograba cartografiar la superficie de la Unión Europea al menos dos veces por año. Primeramente, se emplearon estas misiones y no productos ofrecidos por iniciativas privadas debido a que los datos eran gratuitos. La primera cobertura se realizó en el año 1990, actualizándose los datos en el año 2000, 2006 y 2012, datando la versión más reciente en 2018. La observación repetida de una zona desde el espacio, ha permitido detectar los cambios y la evolución de los usos del suelo, siendo este un producto derivado que se ofrece dentro del programa.

El programa ha evolucionado desde sus orígenes. Prueba de ello es que los programas de observación con los que se inició el proyecto CORINE, se

encuentran en la actualidad fuera de servicio. En la versión más reciente, la información es proporcionada por el programa de observación espacial COPERNICUS, diseñada por la Agencia Espacial Europea (ESA) y financiada por la Comisión Europea (CE). Sin embargo, aunque los materiales han variado, la metodología que se emplea para la clasificación de los usos del suelo se mantiene prácticamente invariable. A continuación, se muestran las principales características que mantiene el programa.

1. *Extensión mínima cartografiada:* Se define como extensión mínima aquella superficie homogénea o cuya extensión pertenezca al menos en un 75% a una única clase. Esta extensión cartografiada, tiene que tener de una extensión mínima de 25 hectáreas y debe ser completamente distinguible a las clases que la rodean. Para la definición de una nueva clase, se establece como requisitos que esta pueda ser representada claramente en un mapa, provea de información esencial para la elaboración de proyectos y que represente una solución de compromiso entre la definición y los costes que conlleva realizar mapas con un mayor nivel de detalle.
2. *Definición de las clases:* Una clase se define como una superficie homogénea que representa coberturas características que la hacen única. Esta definición es complementaria a la anterior, puesto que para que una nueva clase pueda ser tomada en consideración debe de tener una extensión mínima de por lo menos 25 hectáreas. Siguiendo esta definición, en la actualidad, se encuentran cinco clases principales que se encuentran a su vez subdivididas. En la Tabla 3 se muestran las clases de las que se compone el programa CORINE.

El hecho de que se hayan mantenido las anteriores dos premisas a lo largo de la duración del programa, ha permitido que se puedan realizar comparativas sobre los diferentes usos del suelo dados entre las diferentes actualizaciones. Los cambios encontrados, se ofrecen como un subproducto bajo la denominación CLC_Changes, representándose únicamente aquellas superficies de 5 hectáreas que han sufrido cambios.

Tabla 3. Clases en las que se clasifican los usos del suelo en el programa CORINE LAND COVER. Elaboración propia.
Fuente: CORINE LAND COVER TECHNICAL GUIDE.

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	
1. SUPERFICIES ARTIFICIALES	1.1. Tejido urbano	1.1.1. Tejido urbano continuo	
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo	
	1.2. Zonas industriales, comerciales y de transportes	1.2.1. Zonas industriales o comerciales	
		1.2.2. Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados	
		1.2.3. Zonas portuarias	
		1.2.4. Aeropuertos	
	1.3. Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción	1.3.1. Zonas de extracción minera	
		1.3.2. Escombreras y vertederos	
		1.3.3. Zonas en construcción	
	1.4. Zonas verdes artificiales, no agrícolas	1.4.1. Zonas verdes urbanas	
		1.4.2. Instalaciones deportivas y recreativas	
	2. ZONAS AGRÍCOLAS	2.1. Tierras de labor	2.1.1. Tierras de labor en secano
			2.1.2. Terrenos regados permanentemente
2.1.3. Arrozales			
2.2. Cultivos permanentes		2.2.1. Viñedos	
		2.2.2. Frutales	
		2.2.3. Olivares	
2.3. Praderas		2.3.1. Praderas	
2.4. Zonas agrícolas heterogéneas		2.4.1. Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes	
		2.4.2. Mosaico de cultivos	
		2.4.3. Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural	
		2.4.4. Sistemas agroforestales	
3. ZONAS FORESTALES CON VEGETACIÓN NATURAL Y ESPACIOS ABIERTOS	3.1. Bosques	3.1.1. Bosques de frondosas	
		3.1.2. Bosques de coníferas	
		3.1.3. Bosque mixto	
	3.2. Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea	3.2.1. Pastizales naturales	
		3.2.2. Landas y matorrales	
		3.2.3. Vegetación esclerófila	
		3.2.4. Matorral boscoso de transición	
	3.3. Espacios abiertos con poca o sin vegetación	3.3.1. Playas, dunas y arenales	
		3.3.2. Roquedo	
		3.3.3. Espacios con vegetación escasa	
		3.3.4. Zonas quemadas	
		3.3.5. Glaciares y nieves permanentes	

4. ZONAS HÚMEDAS	4.1. Zonas húmedas continentales	4.1.1. Humedales y zonas pantanosas
		4.1.2. Turberas
	4.2. Zonas húmedas litorales	4.2.1. Marismas
		4.2.2. Salinas
		4.2.3. Zonas llanas intermareales
5. SUPERFICIES DE AGUA	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Cursos de agua
		5.1.2 Láminas de agua
	5.2. Aguas marinas	5.2.1. Lagunas costeras
		5.2.2. Estuarios
		5.2.3. Mares y océanos

SIOSE:

El Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE), tiene como objetivo integrar en una misma base de datos, la información sobre los usos del suelo procedente de las comunidades autónomas y la administración general del estado, con una escala de referencia de 1:25000.

El programa SIOSE, surge de la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN), dentro de sus obligaciones como productora y coordinadora de información en materia de usos del suelo en España. Entre los antecedentes al SIOSE, destaca el programa CORINE, que fue el primero en generar una base de datos sobre ocupación de usos del suelo en España el año 1990. Este programa fue referente al establecer información homogénea para la totalidad de la Unión Europea, realizándose actualizaciones posteriores.

A la vista de la utilidad de disponer de información homogénea en materia de usos del suelo, se lleva a cabo la iniciativa de obtener información con un mayor detalle a nivel nacional, lanzándose en 2005 la primera versión del SIOSE, en la que se integra la información disponible por las diferentes autonomías y la dirección general del estado, constituyendo de esta forma una base de datos armonizada para el conjunto de España con una escala de referencia 1:25000. Posteriormente al primer lanzamiento del programa en el año 2005, se han lanzado actualizaciones del programa en 2009, 2011, siendo la versión del 2014 la más reciente en el momento de redacción de este trabajo fin de máster. Concretamente, los objetivos que persigue el SIOSE son los siguientes:

- Evitar duplicidades y reducir los costes en generación de información geográfica, integrando las comunidades autónomas en el programa.
- Proporcionar información de ocupación de usos del suelo de acuerdo a los requerimientos establecidos por organismos comunitarios.

Por su parte, las etiquetas empleadas para definir los usos del suelo son similares a las que se emplea en el programa CORINE, mostradas en la Tabla 3, como parte del esfuerzo de normalización, homogenización y convergencia con la Unión Europea. Sin embargo, el hecho de que el SIOSE esté destinado para cartografiar únicamente el territorio de España, le permite definir las etiquetas que mejor se ajustan al territorio. En la Imagen 4, se muestra la clasificación de los suelos en el entorno del Mar Menor y las etiquetas empleadas.

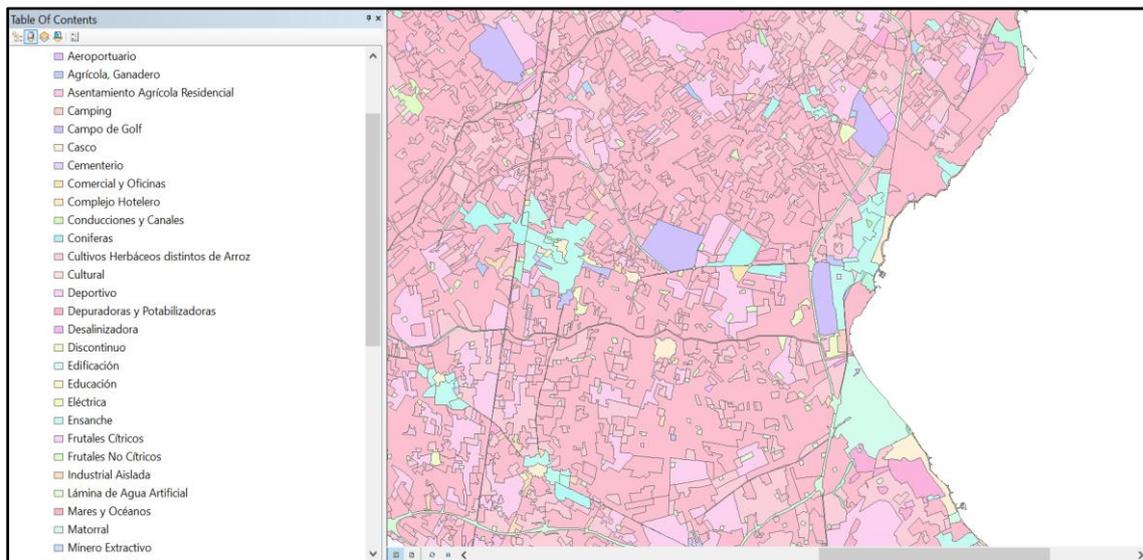


Imagen 4. Clasificación del SIOSE de los usos del suelo en el entorno del Mar Menor. Elaboración propia.
Fuente: SIOSE 2014.

Para la generación de los productos cartográficos, el SIOSE se nutre de información proveniente del satélite SPOT5, que dispone de una cámara multiespectral y una pancromática de 10 y 2,50 metros de resolución espacial respectivamente. Además, se emplean ortofotos provenientes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) para el año de referencia, datos de líneas límite entre las Comunidades Autónomas y finalmente se integran las diferentes bases de datos disponibles.

Finalmente, el SIOSE ofrece una mayor resolución que el programa CORINE, dependiendo del uso del suelo y la ocupación del mismo, tamaño mínimo de los polígonos cartografiados varía entre las 2 hectáreas para zonas agrícolas, forestales y naturales; 1 hectárea para zonas artificiales y 0,5 hectáreas que se asignan para las zonas de agua, playas, vegetación de ribera, coberturas húmedas y cultivos bajo plástico o invernaderos. (Equipo Técnico SIOSE 2014, 2018). La información que se ofrece tanto en el CORINE como en el SIOSE, es de carácter público y gratuita.

Catastro

Aunque la finalidad principal del catastro es de índole tributario, al ofrecer información necesaria para la recaudación y la gestión de los inmuebles por parte de los organismos administrativos, se decide mencionarlo brevemente puesto que ofrece información sobre el uso de las parcelas. Además, el catastro se encuentra en actualización continua, aunque se advierte en la página web del catastro, que aproximadamente el 10% de las parcelas cartografiadas no corresponden exactamente con la extensión que disponen en realidad. Los diferentes usos de las parcelas en el catastro se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Catalogación de las parcelas en catastro. Elaboración propia. Fuente: Guía de la Certificación Catastral Descriptiva y Gráfica, Ministerio de Hacienda Y Función Pública.

TEXTO RESUMIDO	TEXTO COMPLETO
ALMACÉN, ESTAC.	Almacén-Estacionamiento
COMERCIAL	Comercial
CULTURAL	Cultural
OCIO, HOSTELERÍA	Ocio, Hostelería
INDUSTRIAL	Industrial
DEPORTIVO	Deportivo
OFICINAS	Oficinas
EDIF. SINGULAR	Edificios Singulares
RELIGIOSO	Religioso
ESPECTÁCULOS	Espectáculos

RESIDENCIAL	Residencial
SANIDAD, BENEFIC.	Sanidad, Beneficencia
AGRARIO	Agrario
SUELO SIN EDIF.	Suelo sin edificar
INDUSTRIAL AGR.	Industrial agrario
ALMACÉN AGRARIO	Almacén Agrario

Finalmente, en el apartado que corresponde al empleo del Catastro como fuente de información en los usos del suelo, el Catastro es empleado dentro del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC), delimitando geográficamente las parcelas declaradas por los agricultores para la demanda y recepción de ayudas, facilitando la producción de soportes gráficos y agilizando los trámites y controles administrativos. Además, el catastro se emplea en la actualidad para el desarrollo de políticas forestales, en las que, por las condiciones de vegetación y aprovechamiento de la mismas, se determinen diferentes políticas fiscales.

En conclusión, el concepto de uso del suelo se trata de un criterio socioeconómico que hace referencia a la actividad dominante que se da en un determinado lugar, incluyendo diferentes usos. La cobertura, es un concepto íntimamente relacionado con el uso, pero sin embargo es un indicador biofísico que describe los materiales que cubren el territorio agua, asfalto, vegetación etc. (Borràs, J. et al.,2017). Los anteriores conceptos son fundamentales, tanto para la identificación de superficies a partir de imágenes satélite como en la hidrología, puesto que, dependiendo de la cobertura del suelo, el agua se comporta de una manera determinada.

2.3.4. Mapa de pendientes y orientaciones:

Los primeros modelos que pretendían modelizar la respuesta hidrológica de una cuenca fueron los concentrados, que trataban de ofrecer una respuesta para una cuenca entera, sin caracterizar explícitamente la variabilidad que ocurría dentro de la misma. Al plantear un modelo concentrado, la cuenca se divide y discretiza en un conjunto de subcuencas, en la que cada subcuenca ofrece unas

características homogéneas bajo el punto de vista del comportamiento hidrológico. Esta tipología de modelos es y ha sido ampliamente utilizada, aunque no sea capaz de representar completamente la variabilidad hidrológica.

Posteriormente aparecen los modelos distribuidos, en el que su enfoque trata de representar por completo la variabilidad de la cuenca de la que se pretende abordar su estudio, caracterizando completamente los parámetros de la misma. En este tipo de modelos, no se establecen subcuencas, sino que los resultados se ofrecen individualmente por cada celda de simulación, estando los resultados condicionados por la resolución de los datos empleados. Entre los principales problemas que ofrece este tipo de modelos, se encuentra la necesidad de obtener información sobre la cuenca de estudio de forma masiva, que, en la realidad, pueden ser difícilmente conseguidos.

Finalmente, aparecen los denominados modelos cuasi-distribuidos, que corresponden a una solución de compromiso entre ambos modelos, obteniendo una resolución intermedia entre los modelos distribuidos y los concentrados. (Pusineri, G., Pedraza, R., Lozeco, C., 2005.)

A la vista del avance de los modelos que pretenden realizar simulaciones hidrológicas, queda patente la necesidad de caracterizar exhaustivamente la cuenca a analizar con la finalidad de suministrar información acertada al modelo hidrológico. En este apartado, destaca la facilidad cada vez mayor de obtener información de coberturas terrestres o datos topográficos y el avance de los sistemas de información geográfica (SIG), gracias a los cuales se aumenta la velocidad de procesamiento de la información de libre acceso permitiendo además el análisis de imágenes satélite, con las que obtener información personalizada al proyecto.

Se ha decidido realizar esta breve introducción, puesto que los sistemas de información geográfica, son los que han permitido el manejo y la integración de modelos de elevación del terreno (MDT). Un MDT, se trata de información numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, A. M. 1994). Aunque la definición escogida date de 1994, esta sigue a día de hoy vigente. Comúnmente, los MDT se ofrecen en formato tipo Ráster o en forma vectorial. Es importante distinguir entre los MDT y los

modelos de elevación del territorio (MDE). Si bien los MDT representan la altitud de la superficie, los MDE representan la altitud de los elementos que se encuentran en la superficie. Para ilustrar este ejemplo, en una zona arbolada, los MDT representarían la elevación del suelo sobre los que los árboles crecen y los MDE representarían la elevación de las copas de los árboles. Los MDT son especialmente empleados para el cálculo de variables topográficas, entre las que destacan las siguientes:

- *Pendiente:* Corresponde al ángulo entre el vector normal a la superficie y la vertical en un punto concreto. Mediante el empleo de los sistemas de información geográfica, es un parámetro que se puede calcular rápidamente y la resolución depende del MDT empleado.
- *Orientación:* Se trata del ángulo existente entre el vector Norte y la proyección de la superficie en el punto concreto. En la Imagen 5, se muestra la orientación de las pendientes en el entorno del Campo de Cartagena.
- *Curvatura:* Se trata de un parámetro de especial relevancia para estudios hidrológicos en los que se pretende modelizar la escorrentía, la erosión y los flujos superficiales en general. Se entiende como curvatura a la tasa de cambio en la pendiente de un punto.

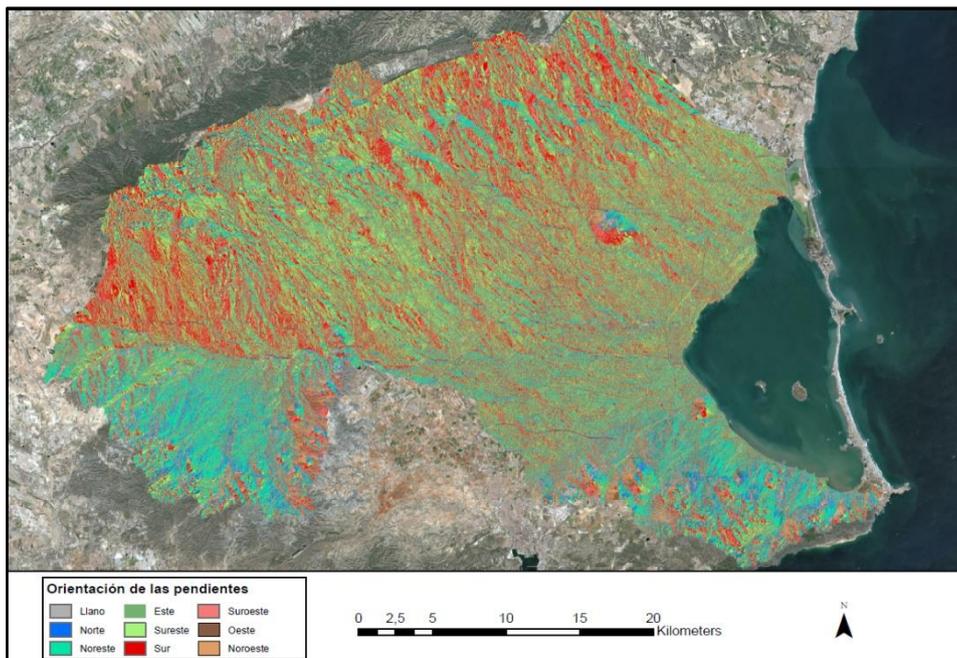


Imagen 5. Mapa de orientaciones del Campo de Cartagena. Elaboración propia.

Como uno de los objetivos de este Trabajo de Fin de Máster es la aplicación de los SIG a la hidrología, a continuación, se detallan los diferentes productos que se pueden obtener a partir de los modelos de elevación del terreno, cuando se aplican en hidrología:

1. Determinación de la dirección del flujo: El agua siempre tiende a moverse buscando las líneas de máxima pendiente. Siguiendo esta máxima, con los SIG y los MDT, se determinan las orientaciones de cada celda, encontrándose la dirección hacia la máxima pendiente. Por lo tanto, la dirección del flujo es aquel camino que recorre una gota de agua drenándose por gravedad, desde una cota superior hacia otra inferior.
2. Acumulación del flujo: Consiste en determinar el drenaje de las celdas, determinando aquellas celdas que drenan en una en particular. Aquellas celdas que sean drenantes, acumulan un mayor flujo, convirtiéndose finalmente en canales de drenaje.
3. Identificación de las redes de drenaje: Con la acumulación del flujo, se permite de posteriormente identificar las redes de drenajes.
4. División de la cuenca: Cuando una zona cumple unas determinadas características (pendiente, orientación, etc.), que hace que el agua se comporte de manera similar en la zona, está puede delimitada como una subcuenca.
5. Propiedades de la cuenca: A partir de los datos introducidos, se pueden ofrecer las propiedades generales de la cuenca; principalmente el drenaje superficial, mediante el cual se puede deducir el valor de la infiltración y la descarga total de la misma.

Como se puede observar, los modelos digitales de elevación resultan parte esencial de los estudios hidrológicos, en cuanto a modelización superficial significa. Es por este motivo, que, en el Libro Blanco del Agua en España, que sirve de referencia metodológica para este Trabajo Fin de Máster, los modelos de elevación son empleados para determinar las cuencas vertientes y las subcuencas, con la finalidad de determinar la esorrentía o acumulación de flujo

en puntos determinados. Dichos puntos, se denominan como “*Puntos de Control*”, y tienen la utilidad de ser empleados como puntos en los que comparar los caudales simulados mediante la modelización y los que suceden en la realidad, con la finalidad de realizar la calibración del modelo.

En el caso de la región de estudio que se evalúa en este proyecto, no existen puntos de control o aforos, con los que poder comparar los resultados obtenidos mediante escorrentía superficial. Por lo tanto, el uso de modelos de elevación digital del terreno queda restringido a posteriores evaluaciones del flujo superficial, requiriendo para esta fase la infiltración que se produce hacia capas subsuperficiales.

2.3.5. Parámetros hidrogeológicos:

Para la evaluación de la infiltración mediante el modelo de Témez, se requiere conocer el coeficiente de rescisión del acuífero (α). Este parámetro, adquiere un valor determinado a partir de las características de formación del acuífero y se considera constante para la extensión del mismo. Como cada acuífero tiene sus características particulares, se debe analizar cuidadosamente la región que se pretenda modelizar, identificando la extensión de los acuíferos principales y sus respectivos coeficientes de rescisión, puesto que el parámetro difiere para cada acuífero y es el responsable de regular el drenaje subterráneo.

En este proyecto, se realiza un análisis hidrogeológico de la zona de estudio en el Capítulo 4, en el apartado de caracterización hidrogeológica, a partir de los datos ofrecidos en la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) y diferentes estudios publicados sobre la zona.

CAPÍTULO 3

CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES SATÉLITE

3.1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE IMÁGENES

La posibilidad de obtener información concreta y detallada de acuerdo a los requerimientos específicos del proyecto, hace que el análisis de imágenes se establezca como una alternativa viable frente al uso de productos estandarizados. De acuerdo a las necesidades específicas y el alcance del proyecto, se pueden elegir diferentes fuentes de imágenes, partiendo desde productos gratuitos, como es el Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) que ofrece imágenes de elevada resolución que se actualizan cada dos o tres años, o programas espaciales, que ofrecen imágenes multiespectrales con frecuencias temporales de semanas o incluso días, hasta programas de iniciativa privada. Lo menester, en la primera fase del análisis de imágenes, es definir las necesidades del proyecto, para finalmente elegir cual es la fuente de imágenes que mejor se adapta a los requerimientos. En la parte respectiva a la clasificación de los usos del suelo, para este Trabajo Fin de Máster, se han identificado los siguientes:

- Dada la necesidad de identificar y caracterizar las zonas agrícolas en una región dónde se realizan cultivos rotativos intensivos, se requiere por lo menos, disponer de una imagen mensual, por lo que la frecuencia temporal del programa que se elija debe ser semanal, para asegurar la posibilidad de una imagen sin nubosidad por mes.
- Preferentemente, se debe de emplear un sensor que pueda captar el espectro del infrarrojo cercano, en el cual, los cultivos según su estado vegetativo muestran su máxima reflectividad, facilitando de esta forma su identificación y clasificación.

- Se pretende disponer de una fuente de información gratuita, que ofrezca la máxima resolución espacial posible, con la finalidad de obtener una clasificación detallada.

Como se ha expuesto, el objetivo del análisis de imágenes en este proyecto es el de identificar las diferentes coberturas de los suelos, puesto que las características particulares de cada tipo influyen en la escorrentía e infiltración. Particularmente, se pretende determinar las parcelas de cultivos, en las que se efectúan riegos y se emplean fertilizantes que son fuente de nitratos.

Para monitorear la evolución de la cobertura del territorio, se realiza lo que se denomina como estudio de detección de cambios y tiene como objetivo analizar que rasgos presentes en un determinado territorio se han modificado entre dos o más fechas. (Chuvienco, E., 2006).

De acuerdo a la definición propuesta por Chuvienco, para detectar los cambios en la superficie se requiere disponer de imágenes multitemporales, identificando las áreas de cambio en la superficie mediante la comparación de estas. En este apartado, el tiempo se erige como un factor relevante, ya que existen procesos que de un menor dinamismo como es por ejemplo el crecimiento urbano o la evolución de una masa forestal y cambios que ocurren en cuestión de días, relacionados principalmente con factores meteorológicos, como son las inundaciones. Por lo tanto, dependiendo del proceso que se pretenda detectar, se requerirá de un monitoreo anual, mensual o diario. Partiendo de la anterior premisa los análisis se pueden agrupar en dos grupos: (Chuvienco, E., 2006).

- Análisis multiestacional: Se da principalmente en estudios agrícolas, en los que se pueden distinguir diferentes cultivos dependiendo de su fecha de plantación y recolección. Para ello, es necesario recolectar imágenes en diferentes épocas del año, atendiendo a los calendarios de plantación.
- Análisis multianual: En un análisis multianual, se pretende evaluar los cambios acontecidos en una cubierta determinada en un periodo largo en el tiempo. Para ello, es recomendable utilizar imágenes captadas en la misma época del año, preferiblemente en verano, cuando la cubierta vegetal se muestra más estable.

Sin embargo, el análisis de imágenes dista de ser un proceso automático una vez se ha obtenido la información ofrecida por plataformas espaciales. Para obtener unos resultados satisfactorios, es necesario efectuar una serie de tratamientos sobre la imagen, con el fin de eliminar las posibles distorsiones y permitir de esta forma una clasificación homogénea de la serie de imágenes, independientemente de la época o condiciones en las que fueron tomadas.

3.2. TRATAMIENTO DIGITAL DE LA IMÁGENES SATÉLITE PREVIO A LA CLASIFICACIÓN.

Para comprender el funcionamiento de los sensores espaciales encargados de captar las imágenes satélite, es necesario introducir los conceptos de radiación electromagnética y reflexión, así como analizar brevemente la interacción entre el sensor y el comportamiento del medio que se interpone entre el sensor y la superficie, es decir, la atmósfera.

En la actualidad, existen dos teorías que tratan de explicar la radiación electromagnética. En primer lugar, se encuentra la **Teoría Ondulatoria**, que explica que la radiación se transmite forma armónica y continua a la velocidad de la luz, mediante una componente eléctrica y otra magnética, definidas por la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f). La **Teoría Cuántica** establece que la radiación electromagnética se compone de una sucesión de fotones de masa igual a cero. Esta teoría, permite calcular la energía de un fotón de acuerdo a su frecuencia (f), correspondiendo las altas frecuencias a mayores niveles energéticos y viceversa. (Peri, C., 2012).

A partir de los anteriores parámetros, es posible realizar una discriminación del espectro electromagnético. Enfocados en el uso de la teledetección, con las tecnologías actuales, caben destacar las siguientes bandas espectrales de acuerdo a la longitud de onda:

- Espectro Visible (VIS: 0,4 - 0,7 μ m). Se denomina como visible, puesto que es el único tipo de radiación que es capaz de distinguir el ojo humano.

Dentro de este espectro, se identifican los tres colores primarios, el rojo (0.7 a 0.6 μm), el verde (0.6 a 0.5 μm) y el azul (0.5 a 0.4 μm).

- Infrarrojo cercano (NIR: 0,7 – 1,3 μm). Se emplea principalmente para la detección y caracterización de coberturas vegetales, puesto que en estas longitudes de onda la vegetación muestra su máxima reflectividad.
- Infrarrojo medio (SWIR: 1,3 – 8 μm). Esta región es empleada por los sistemas de teledetección para identificar el contenido de agua en los suelos. En las longitudes más elevadas del infrarrojo medio, se logran captar los focos terrestres emisores de radiación, todos ellos de elevada temperatura, como son los incendios.
- Infrarrojo lejano (TIR: 8 - 14 μm). A elevadas longitudes de onda, se caracterizan e identifican la gran mayoría de superficies terrestre emisoras de calor.

Para ilustrar los conceptos anteriores, la Imagen 6 muestra la clasificación de la radiación electromagnética:

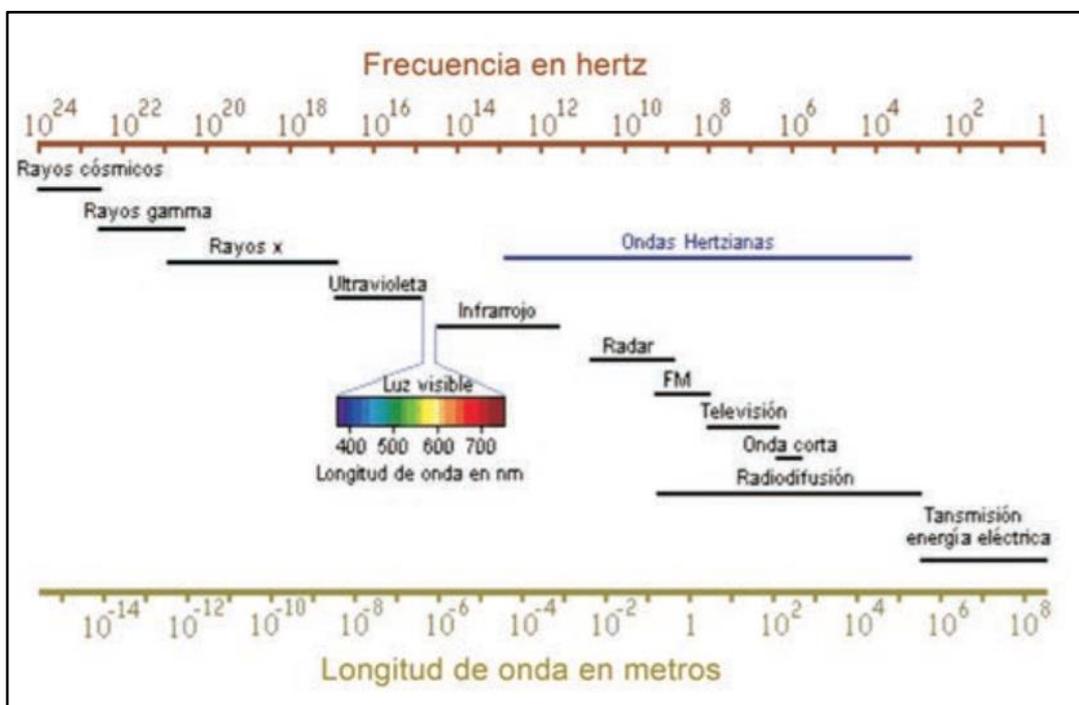


Imagen 6. Clasificación del espectro electromagnético de acuerdo a la frecuencia y longitud de onda. Fuente: Ordoñez, J. L. (2012).

Todos los objetos (independientemente de la radiación que emitan) son receptores de radiación emitida por otros cuerpos. Al incidir la radiación electromagnética sobre los objetos, esta puede absorberse, reflejarse o transmitirse. (Chuvienco, E., 2008). Para que la radiación reflejada y/o emitida por las superficies u objetos terrestres sea captada por las plataformas espaciales, primero debe atravesar la atmósfera. Los gases que la componen, interactúan con la radiación, principalmente absorbiéndola. Las longitudes de onda que son alteradas mínimamente por la atmósfera se denominan como **ventanas atmosféricas** y son las empleadas por las plataformas espaciales puesto que permiten una mejor transmisión de la energía entre la plataforma espacial y la superficie terrestre.

Así, la atmósfera se convierte en el medio en el que ocurre la transmisión de la energía. Debido a su heterogeneidad y condiciones cambiantes, este medio puede que no ofrezca unas condiciones constantes para la transmisión de la radiación desde la Tierra hacia el espacio o viceversa, lo que constituye a la atmósfera como un factor que induce a distorsiones de la imagen. Además de este tipo de alteraciones, se suman las producidas por la propia geometría y orografía terrestre, así como las producidas por fallos casuales en el sistema sensor.

Por lo tanto, el primer paso para realizar un análisis multitemporal mediante el empleo de imágenes satélite, corresponde en identificar las posibles fuentes de error y efectuar una serie de tratamientos digitales o correcciones sobre la imagen obtenida, con la finalidad de obtener un producto homogéneo a lo largo de la serie temporal, apto para evaluar los cambios que ocurren sobre la cubierta terrestre.

Se entiende como corrección, a aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea distorsiones en el global de la imagen o en radiometría de los píxeles que la componen. A continuación, se identifican las principales fuentes de error que se pueden dar en las imágenes satélite: (Chuvienco, E., 2008).

1. Distorsiones causadas por anomalías de funcionamiento en la plataforma portadora del sensor. Aunque los satélites giran alrededor de la Tierra en órbitas muy estables, una pequeña variación en la velocidad, altitud u orientación, puede provocar anomalías en las imágenes, que además son difícilmente predecibles.
2. Distorsiones provocadas por la rotación terrestre. Los sensores, utilizan el método del barrido para captar la imagen. Se da la circunstancia que, desde que el barrido empieza hasta que se finaliza completando la imagen, la Tierra se encuentra en rotación, alcanzando la velocidad máxima en el ecuador, provocando que la imagen tome una orientación característica. Este factor unido al relieve irregular y a la curvatura terrestre, induce variaciones en el tamaño del píxel.
3. Distorsiones provocadas por el sensor. En el proceso de barrido de la imagen, varios factores pueden afectar al sensor, provocando que este no realice el barrido de la forma establecida.
4. Distorsiones provocadas por la atmósfera. La composición de la atmósfera causa alteraciones en la radiación reflejada sobre la superficie terrestre. Algunos de los problemas que ocasionan los aerosoles, vapor de agua y demás gases, se suelen solventar fácilmente con procedimientos establecidos, siendo vital en estudios multitemporales realizar una correcta corrección atmosférica.

En resumen, dependiendo del tipo de afección que se produce en la imagen, se hablan de correcciones radiométricas, cuando se aplican técnicas orientadas a alterar los niveles digitales (ND) o correcciones geométricas, cuando la finalidad de las acciones es alterar la posición de los píxeles que componen la imagen. Finalmente, se muestran los diferentes tipos de correcciones que pueden ser aplicadas de acuerdo a la anterior clasificación.

3.2.1. Correcciones radiométricas:

Como se ha descrito anteriormente, están orientadas a modificar los niveles digitales, sin embargo, existen diferentes tipos de correcciones radiométricas. Esto es debido a que hay procedimientos que se centran en restaurar líneas o píxeles perdidos y otros en modificar el ND de los píxeles sin que haya habido un mal funcionamiento del sensor, puesto que se han producido interferencias durante la captación de la imagen, por ejemplo, atmosféricas. Entre los diferentes tipos de correcciones radiométricas, se distinguen las siguientes: (Chuvienco, E. 2006)

- Restauración de píxeles o líneas perdidas. Debido a un mal funcionamiento del sensor, puede que aparezcan píxeles o líneas sin un valor asignado. En estos casos, el valor que se asigna al píxel o línea perdida se estima a partir del promedio de los píxeles vecinos.
- Eliminación del bandeo de la imagen. Esta corrección se debe a una mala calibración del sensor que causa un bandeo característico. Este efecto, es más visible en aquellas superficies que absorben gran parte del espectro electromagnético, como es el caso del agua. Para corregir el bandeo, basta con realizar un análisis estadístico de los histogramas de la imagen, asumiendo que los ND de las zonas bandeadas deben adquirir valores de ND cercanos a la media global de la imagen.
- Corrección atmosférica. Este tipo de correcciones se deben a las distorsiones que induce la atmósfera sobre la reflexión de las superficies, no estando producidas como los anteriores dos casos por un inadecuado funcionamiento del sensor. Existen diferentes métodos que permiten abordar este tipo de correcciones, destacando por ser la alternativa más precisa para eliminar distorsiones atmosféricas la realización de radio sondeos el día de la toma de la imagen, que identifican la absortividad y reflectividad atmosférica. Los otros tres métodos válidos, aunque de menor precisión, corresponden al empleo de imágenes captadas por otros sensores, la elaboración de modelos físicos de transferencia radiativa basados en atmósferas estándar y a partir de datos procedentes de la misma imagen.

3.2.2. Correcciones geométricas:

Se definen como correcciones geométricas todas aquellas acciones destinadas a variar la posición inicial de los píxeles en la imagen. En la actualidad, existen dos procedimientos con los que abordar las correcciones geométricas. El primero, mediante la distribución uniforme y representativa a lo largo de la superficie representada en la imagen de puntos en los que sus coordenadas son conocidas por el intérprete. Estos puntos, se denominan como **puntos de control** y permiten el ajuste de una forma empírica de los píxeles de la imagen. El segundo método, consiste en determinar y conocer todas las fuentes que producen errores geométricos en el proceso de captación de la imagen por parte del sensor. Una vez conocidas las fuentes de error y los procesos que los provocan, se trata de aplicar digitalmente de manera inversa el mismo error producido durante la fase de captación de la imagen de forma que los errores se anulen y la imagen resultante se encuentre libre de errores geométricos.

3.2.3. Realces de imagen:

A diferencia de las correcciones, los realces no tienen la finalidad de eliminar ningún tipo de distorsión, sino de facilitar la identificación de elementos y geometrías en la imagen, facilitando de esta forma su posterior interpretación. El realce, se trata de una de las principales técnicas que componen el procesamiento digital, tratándose de un conjunto de operaciones que permiten mejorar la calidad de la imagen, realzando las características, brillos o contrastes reduciendo el ruido. (Aldalur B. y Santamaría M., 2002). Entre las diferentes técnicas para realzar una imagen, se encuentra el ajuste del contraste, el filtrado de la imagen y la composición de bandas. Finalmente, se expone una breve descripción de cada una de las técnicas empleadas.

Ajuste del contraste:

El ajuste del contraste surge para adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad que tiene el monitor para su visualización. Se habla de compresión del contraste cuando la profundidad de la imagen es mayor que la capacidad que tiene el proyector para representarla. Este hecho se daba

principalmente al inicio de la era digital, cuando los ordenadores no tenían la suficiente capacidad para representar la imagen. Cuando sucede la situación contraria, se habla de procesos de expansión del contraste, cuando el rango de ND es menor que el nivel de resolución del ordenador. (Chuvieco, E., 2006).

En la actualidad, los sensores codifican las imágenes con una profundidad de 256 (2^8), que permite ser representado sin problemas por los sistemas de visualización actuales. Sin embargo, el ojo humano no es capaz de distinguir por completo las 256 tonalidades que se visualizan, por lo que puede ser recomendable aplicar técnicas de expansión del contraste, para ayudar al intérprete a discriminar los diferentes objetos que se representan.

Filtrado de imagen:

Esta técnica se aplica en el análisis de imágenes para aislar e identificar posibles componentes que resulten de interés. Los filtros de imagen transforman los ND originales de la imagen, permitiendo que estos se asemejen o distingan de los píxeles que lo rodean. En el primer caso, se habla de filtros de paso bajo, denominándose filtros de paso alto aquellos que buscan que los píxeles resalten frente a sus vecinos. (Aldalur B. y Santamaria M., 2002).

Como se ha expuesto brevemente, los filtros de paso bajo tratan de suavizar los contrastes espaciales presentes en una imagen, alterando los ND. Como resultado, los ND de los píxeles se asemejan a los de su vecino, aumentando la homogeneidad de la escena. Visualmente, una imagen que se ha sometido a un filtro de paso bajo, ofrece geometrías menos nítidas y más difuminadas. Otra de las funciones de un filtro bajo, es la de restaurar y/o atenuar los errores aleatorios que se pueden presentar en los ND de la imagen, puesto los píxeles que presentan distorsiones adquieren un valor influido por los valores de ND de los píxeles vecinos, que no presentan distorsiones.

Al contrario que los filtros de paso bajo, los filtros de paso alto, pretenden aislar los componentes que reflejan una alta frecuencia espectral en la imagen. De esta forma, se consigue realzar digitalmente los contrastes entre píxeles vecinos, enfatizando figuras geométricas que componen la imagen, como son las carreteras, parcelas agrarias y accidentes geológicos.

Combinaciones de color:

En las imágenes captadas por sensores multiespectrales, las combinaciones de color representan una técnica de aplicación sencilla para el usuario, permitiendo realizar una gran variedad de realces y destacar visualmente aquellos elementos que resultan de interés. Este tipo de imágenes, pueden ser representadas en un monitor mediante una escala de grises o, por el contrario, pueden ser coloreadas mediante los colores primarios (RGB). La combinación de las bandas roja, verde y azul que proporciona el sensor en los canales del proyector dará como resultado la representación de la imagen a color natural. Toda aquella combinación que no corresponda con esta, es considerada como falso color. Dependiendo de los elementos que se pretenden resaltar en el análisis de la imagen, existen diferentes tipos de combinaciones de bandas. Se presentan a continuación, las combinaciones más usadas para el sensor multiespectral del satélite europeo Sentinel-2,

- Color natural. Representación de la imagen en la coloración real. Se trata del resultado al representar las bandas correspondientes a los colores primarios en sus correspondientes canales (4, 3, 2).
- Falso color. Se emplea para discriminar e identificar con facilidad las masas de agua, independientemente del tamaño de las mismas. Esta combinación se obtiene al combinar las bandas (8, 11, 4) de la imagen en los canales rojo, verde y azul.
- Índice de penetración atmosférica. Mediante la representación de las bandas (12, 11, 8A), se logra resaltar aquellas coberturas que presentan un elevado albedo. Por lo tanto, este índice es el adecuado para destacar invernaderos o polígonos industriales.
- Infrarrojo (8, 4, 3). Esta combinación se emplea especialmente para la determinación de cubiertas vegetales, puesto que las representa con un color rojo. A mayor vigorosidad y crecimiento de la vegetación, mayor intensidad. La Imagen 7, muestra la combinación de infrarrojo en el entorno del Mar Menor, sobre una imagen captada por el satélite Sentinel-2, distinguiéndose por su color rojo más intenso las zonas de cultivo intensivo de regadío.



Imagen 7. Combinación de bandas para resaltar las cubiertas vegetales en el entorno del Mar Menor. Imagen tomada el 12/01/2018 por el Satélite Sentinel 2.

3.3. MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN

Una vez se han identificado las posibles fuentes de error en la toma de las imágenes satélite, exponiéndose los diferentes métodos existentes para corregirlas y se han analizado los diferentes realces, se está en disposición de iniciar el proceso de clasificación de la imagen. Para la clasificación, se parte de una imagen multispectral o pancromática, en la que los valores de los píxeles (ND) han sido determinados a partir de la reflectividad de la cubierta terrestre. Los resultados de la clasificación, sin embargo, otorgan un valor a los píxeles que poco tiene que ver con la reflectividad inicial que ofrecían, sino que se les establece un valor de acuerdo a los deseos del usuario.

De esta forma, la clasificación de una imagen consiste en agrupar, de acuerdo a las características de la cobertura terrestre captadas por el sensor (reflectividad, textura, situación, geometría, etc.) una serie de píxeles que comparten total o parcialmente estas características entre ellos, de acuerdo a los intereses del usuario. Cada agrupación de píxeles que comparten unas características similares se la denomina como clase o categoría y se definiéndose tantas categorías como se deseen.

Aunque en el momento de abordar una clasificación de imagen se pueda decidir aleatoriamente el número de categorías que conformarán la clasificación, es muy recomendable realizar previamente una fase de entrenamiento. La fase de entrenamiento, consiste en realizar una propuesta de clases de acuerdo a la variabilidad espectral existente entre ellas. De acuerdo a Chuvieco, E. (2006), en todo proceso de clasificación de imágenes se distinguen en orden cronológico las siguientes fases:

1. Definición digital de las categorías. Denominada como fase de entrenamiento, consiste en realizar la propuesta de clases en las que la imagen va a ser clasificada, de acuerdo a la variabilidad espectral, empleándose para esta fase el uso de histogramas.
2. Agrupación de los píxeles en cada una de las categorías definidas. Se dota a los píxeles del valor asignado en la fase de entrenamiento de acuerdo a la categoría en la que se clasifica.

3. Comprobación y verificación de los resultados. Una vez se ha realizado la agrupación de los píxeles dentro de cada categoría definida, se debe comparar sobre el terreno la clasificación realizada, existiendo diferentes métodos estadísticos con los que evaluar la efectividad de la clasificación.

La clasificación se beneficia de las correcciones y los realces, pero hay que tener en cuenta que no es preciso emplearlos. Esto es debido a que la clasificación de una imagen se realiza de acuerdo a los ND y que, si la radiometría se encuentra distorsionada o afectada por alguna condición en particular, afecta por igual a todos los píxeles de la escena. De esta forma, la clasificación de una imagen no busca caracterizar de una forma absoluta una cubierta, sino que trata de realizar una caracterización relativa, válida para un territorio e imagen concretos. Sin embargo, la anterior afirmación no es aplicable cuando se pretenden realizar análisis multitemporales, en los que se requiere realizar comparaciones entre imágenes tomadas en fechas diferentes y las condiciones con las que estas se tomaron pueden variar.

3.3.1. Fase de entrenamiento:

La fase de entrenamiento se trata de la primera etapa de la clasificación digital, consistente en establecer y definir las categorías que se pretenden distinguir en la imagen. Como se ha comentado, la clasificación consiste en agrupar aquellos píxeles que comparten unas características radiométricas similares entre sí. Por lo tanto, los ND de los píxeles que componen cada una de las categorías, tienen entre ellos una determinada dispersión. La fase de entrenamiento, trata de caracterizar esa dispersión, obteniendo el intervalo en que los ND corresponden a una determinada clase. (Chuvienco, E., 2006).

Para ello, en la fase de entrenamiento, se seleccionan muestras de píxeles que representan adecuadamente a cada categoría. A partir de las muestras, se calculan los ND medios, y mediante fórmulas estadísticas el rango en el que varía cada clase. La clasificación posterior se realiza de acuerdo a las muestras seleccionadas, por lo que resulta determinante realizar una adecuada fase de entrenamiento, que permita diferenciar correctamente cada una de las muestras

de una forma clara entre ellas, que el método de clasificación que se emplee a continuación. En las Imágenes 8 y 9, se ilustran los conceptos anteriormente expuestos, mostrando las diferencias en los valores medios de ND entre dos categorías, concretamente las denominadas como *Huerta* y *Barbecho*.

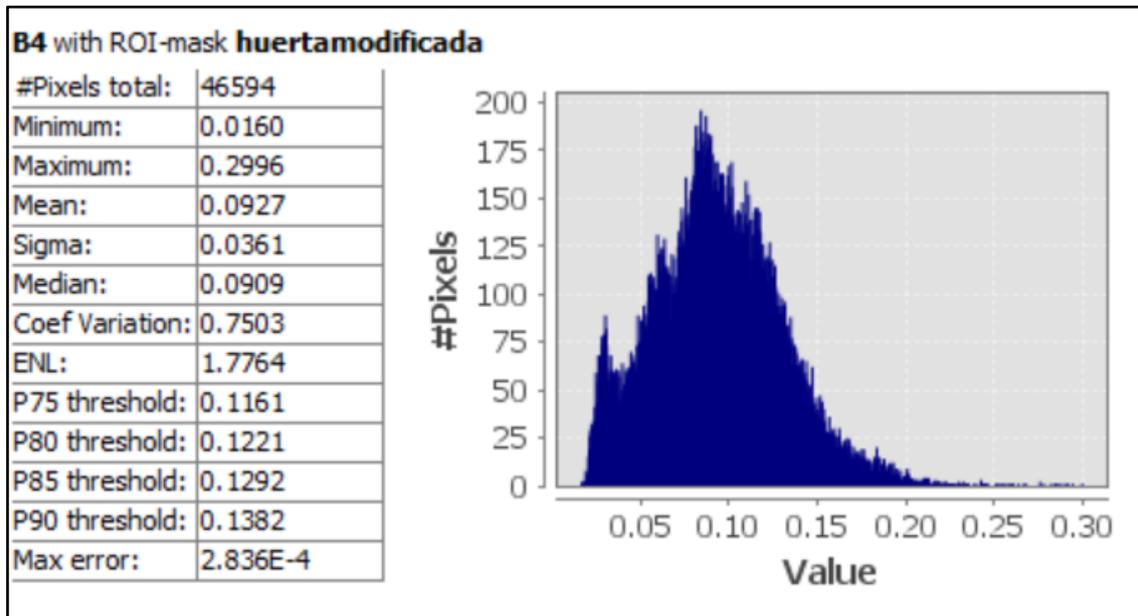


Imagen 8. Histograma y valores estadísticos de los ND en la banda 4 para la categoría denominada como Huerta. Elaboración propia.

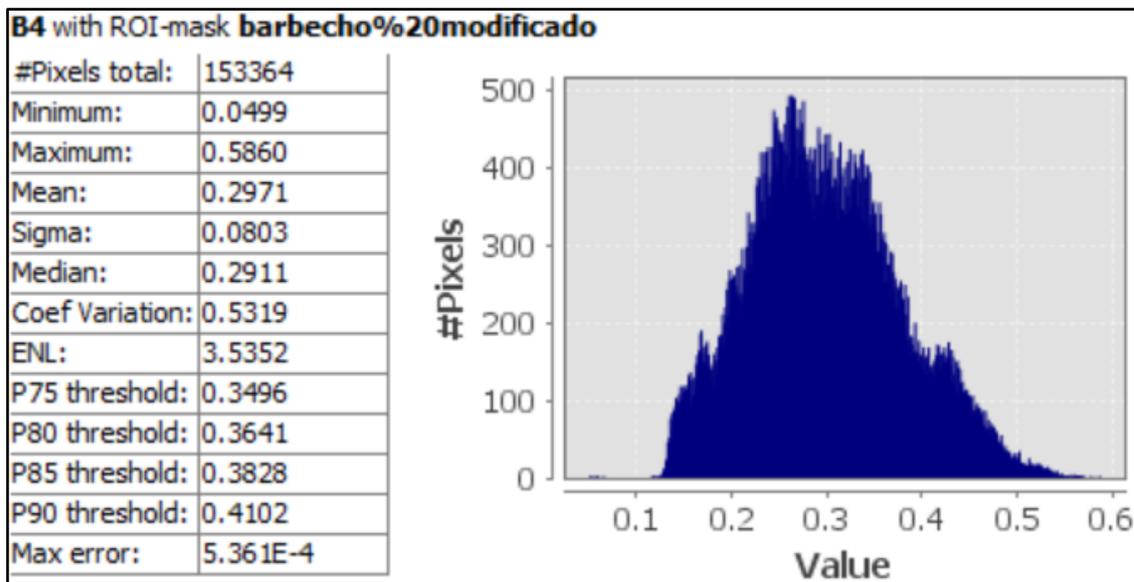


Imagen 9. Histograma y valores estadísticos de los ND en la banda 4 para la categoría denominada como Barbecho. Elaboración propia.

Al analizar detalladamente las Imágenes 8 y 9, se observa que, en la clase definida como huerta, el valor medio de los píxeles en la banda cuatro es de 0,093, mientras que en el caso de barbecho es de 0,297. Se trata de una diferencia clara que permite realizar la clasificación, sin embargo, pensando que los valores de ND de los píxeles de cada clase se distribuyen estadísticamente de acuerdo a una curva de Gauss, los valores extremos (mínimos y máximos) de cada histograma pueden coincidir, entremezclándose y siendo más difíciles clasificar satisfactoriamente. Es lo que se conoce como superposición de clases. Para ilustrar este fenómeno, la Imagen 10 muestra un ejemplo de superposición entre dos clases, en la que los valores de ND extremos del histograma de la categoría A y B se entremezclan, dificultando al software la clasificación dichos píxeles.

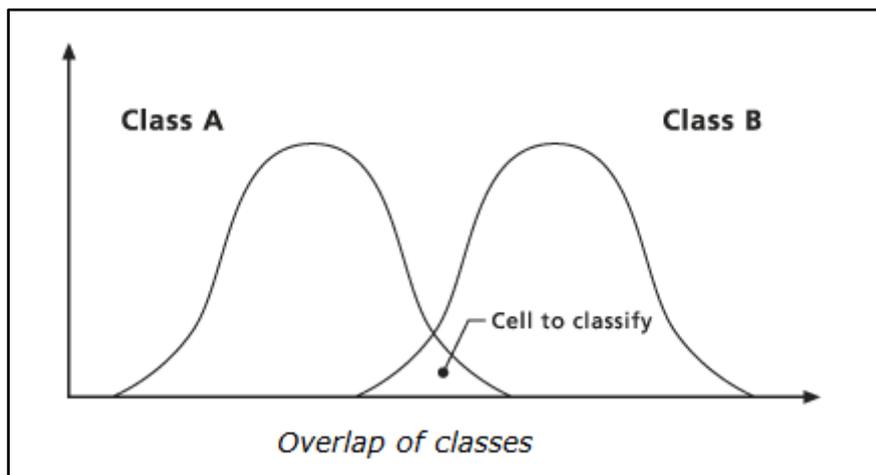
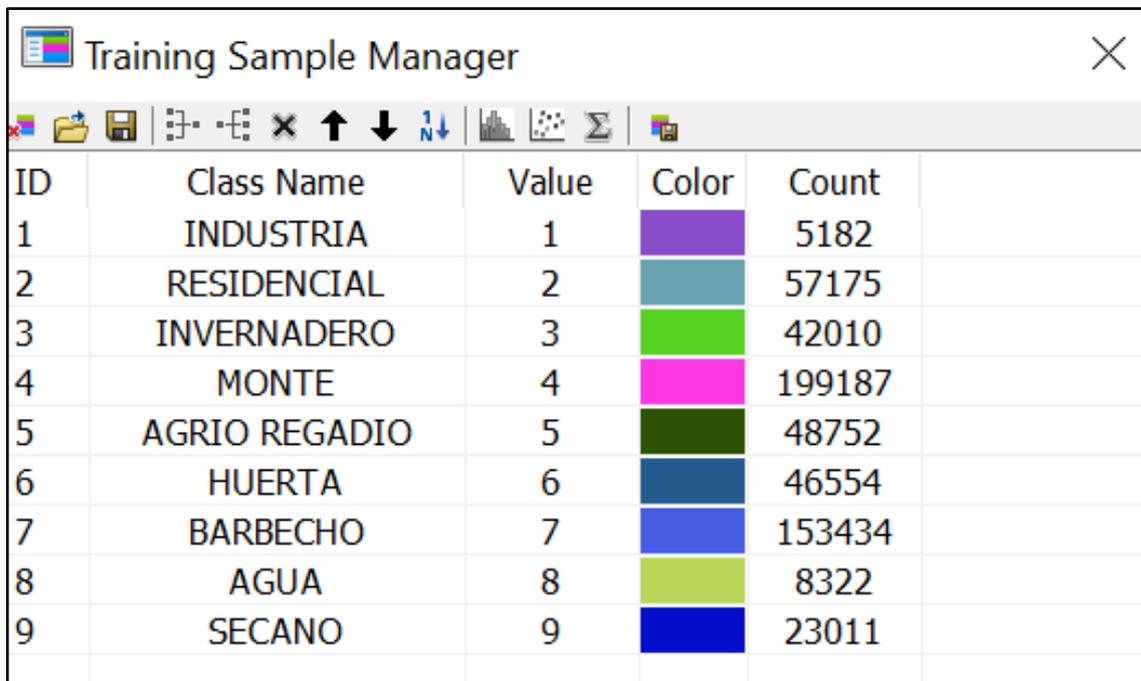


Imagen 10. Ejemplo de superposición de clases. Fuente: ESRI

Respecto a la fase de clasificación, se puede distinguir entre métodos supervisados cuando se parte de un conocimiento del terreno que permite al usuario establecer las diferentes categorías y los métodos no supervisados, cuando la clasificación se realiza a partir de una agrupación automática de valores de respuesta espectral homogéneos, correspondiendo al usuario en una última fase identificar las similitudes entre los grupos que se han seleccionado automáticamente y las categorías que le pueden resultar de interés. Consecuentemente, existen dos tipos de clases que intervienen en la clasificación, las informacionales y las espectrales. Las clases informacionales

son las que establece el usuario e intentan ser las clases en las que se discrimina la imagen. La Imagen 11, muestra a modo de ejemplo, las clases informacionales que se han definido en este proyecto para llevar a cabo la clasificación.



ID	Class Name	Value	Color	Count
1	INDUSTRIA	1	Purple	5182
2	RESIDENCIAL	2	Teal	57175
3	INVERNADERO	3	Light Green	42010
4	MONTE	4	Magenta	199187
5	AGRIO REGADIO	5	Dark Green	48752
6	HUERTA	6	Dark Blue	46554
7	BARBECHO	7	Blue	153434
8	AGUA	8	Light Green	8322
9	SECANO	9	Dark Blue	23011

Imagen 11. Muestra de las clases informacionales definidas en el proyecto. Elaboración propia.

Sin embargo, las clases espectrales corresponden a los píxeles que tienen un ND o reflectividad similar. Idealmente, debería existir una relación perfecta entre las clases espectrales y las informacionales, pero este hecho raramente ocurre, desencadenando en alguna de las siguientes situaciones:

1. La categoría informacional propuesta por el usuario se encuentra expresada en varias categorías espectrales.
2. Dos o más clases informacionales comparten una misma clase espectral. La solución más sencilla para este tipo de problema, consiste en fundir las clases informacionales que comparten la misma firma espectral.
3. Varias clases informacionales, comparten varias clases espectrales. En este caso, es conveniente revisar la fase de entrenamiento y redefinir las clases informacionales propuestas.

Atendiendo a las anteriores afirmaciones, parece claro que, con el empleo del método supervisado, se pretenden definir las clases informacionales mientras que el método no supervisado trata de identificar las diferentes clases espectrales que se hallan en una imagen. Por lo tanto, no existe un método que permita realizar una clasificación perfecta, sino que ambos tienen sus fortalezas y debilidades. El método supervisado, tiende a realizar una clasificación de acuerdo a los deseos del usuario, que no siempre concuerdan con la realidad espectral, mientras que el método no supervisado, permite realizar una clasificación a partir de la reflectividad de los píxeles de acuerdo al algoritmo empleado. Sin embargo, las clases resultantes empleando el método no supervisado pueden resultar difíciles de interpretar para el usuario y estar poco conectadas con las necesidades del proyecto.

3.3.2. Clasificación no supervisada:

La clasificación no supervisada trata de definir las clases espectrales presentes en la imagen. Para ello, no se requiere de intervención alguna por parte del usuario, sino que es el software el que realiza la discriminación de acuerdo al número de clases que se desean crear. Este método, basa su funcionamiento en la agrupación de los píxeles de la imagen de acuerdo a sus propiedades espectrales formando *clusters* o clases temáticas de interés.

Las clases espectrales o *clusters* no siempre se corresponden a las clases informacionales que se desean obtener, por lo que, en una clasificación no supervisada, el usuario tiene que realizar una interpretación posterior con la finalidad de asignar a cada *clúster* una categoría informacional. La forma en la que se realizan las agrupaciones de píxeles, depende de las variables que intervienen en el análisis, los criterios empleados para medir la similitud entre los píxeles y la metodología con la que se realizan las agrupaciones.

Como variables, se definen el número de bandas espectrales que se emplean en la clasificación. La clasificación inicial que define cada uno de los clústeres, se define a partir de los valores de ND de los píxeles y la agrupación de los píxeles en cada grupo espectral se realiza de acuerdo a dos criterios: uno que mide la similitud de los ND de los diferentes píxeles y otro que marca las

condiciones del agrupamiento durante el proceso. La ecuación más empleada para determinar la similitud entre los píxeles es la distancia euclidiana, representada en la Ec.16.

$$d_{a,b} = \sqrt{\sum_{i=1,m} (ND_{a,i} - ND_{b,i})^2} \quad Ec. 16$$

Dónde:

$d_{a,b}$ corresponde a la distancia entre dos píxeles cualesquiera a y b.

$ND_{a,i}$ y $ND_{b,i}$ se trata de los valores digitales de ambos píxeles en la banda i.

m se trata del número de bandas.

Para la fase correspondiente al agrupamiento de los píxeles, existen un gran número de métodos y ecuaciones que cumplen con el cometido. Sin embargo, el algoritmo más empleado es el ISODATA, que cuenta con un proceso iterativo con el que realiza la agrupación. Entre los problemas que conlleva el empleo de un método no supervisado, destaca la dificultad de elegir los parámetros que definen el control de los algoritmos, correspondiendo al usuario ir estableciéndolos de una manera arbitraria hasta que conseguir un resultado satisfactorio. Otro de los problemas que puede presentar la clasificación no supervisada radica en gran número de iteraciones y cálculos empleados, ya que consumen grandes recursos y requieren de tiempo mínimo de procesamiento.

Finalmente, el método no supervisado, puede considerarse bien como un método de clasificación completo o bien como complementario al método supervisado, al poder establecerse en una primera aproximación las diferentes clases de entrenamiento y permitir distinguir las principales homogeneidades espectrales entre las diferentes clases. Para la realización de este trabajo, se empleó el método no supervisado de una forma complementaria, con el que definir las diferentes clases espectrales y definir el número óptimo de categorías. Así, en la Imagen 12, se muestra una clasificación no supervisada del entorno de Los Alcázares.



Imagen 12. Clasificación no supervisada del entorno del término municipal de Los Alcázares. Muestra del uso de la clasificación no supervisada como método complementario para determinar el número de clases espectrales que se requieren para el proyecto. Elaboración propia.

3.3.3. Clasificación supervisada:

Para llevar a cabo este tipo de clasificaciones, se requiere un mínimo de conocimiento sobre la zona de estudio por parte del usuario, adquirido bien mediante experiencias previas o por trabajos de campo. El conocimiento de la zona resulta esencial, puesto que permite delimitar las denominadas áreas de entrenamiento. Estas áreas, se tratan de zonas descritas por el usuario que permiten al software de clasificación obtener los valores de ND de las diferentes categorías para finalmente agrupar el resto de píxeles que conforman la imagen en torno a ellos, de acuerdo a sus características espectrales. (Chuvieco, E., 2006).

Las regiones de entrenamiento se definen actualmente con relativa facilidad, ya que los software permiten al usuario la creación de polígonos con los que determinar cada una de ellas. También existen métodos semiautomáticos, que, en vez de obligar al usuario a definir un polígono al completo, basta con seleccionar un único píxel central del polígono, y a partir de sus características se agregan automáticamente el resto de píxeles que conforman el polígono. La ventaja de emplear un método semiautomático radica en que se tiene la certeza de que los píxeles que conforman las regiones de entrenamiento tienen características homogéneas, puesto que se han agregado automáticamente a partir del ND del píxel de referencia, evitando ruidos que se puedan producir al definir manualmente polígonos de una mayor amplitud.

Para esta primera fase de la clasificación supervisada, resulta muy interesante el empleo de documentación auxiliar, como son los mapas cartográficos y fotografías aéreas de elevada resolución, pertenecientes a la zona de estudio y realizados en fechas exactas o próximas al de la adquisición de la imagen satélite que se pretende clasificar. Igualmente importante, resulta realizar una correcta asignación de los polígonos a cada una de las categorías ya que si no, se está forzando al software a clasificar firmas heterogéneas que se encuentran dentro de una misma clase, condicionando el resultado de la clasificación. La Imagen 13 muestra la delimitación de polígonos en fase de entrenamiento realizada en el entorno del municipio de Torre Pacheco.



Imagen 13. Delimitación de las regiones de entrenamiento en el entorno del municipio de Torre-Pacheco. Imagen captada en mayo 2018 por el satélite Sentinel-2. Elaboración propia.

Ya que las áreas de entrenamiento se suponen fieles representaciones de las diferentes categorías, resulta imprescindible establecer unas condiciones con las que establecer los polígonos que conforman las regiones de entrenamiento. Preferentemente, cada polígono definido debe de estar compuesto por un número de píxeles mayor que el número de bandas que se emplean para la clasificación, mejor cuantos más píxeles representan una clase, ya facilita la representación de la heterogeneidad espectral dentro de la misma. En el mismo sentido, es preferible seleccionar numerosos polígonos que uno grande con el mismo número de píxeles que los pequeños, ya que de esta forma se puede representar de una forma más acertada la variabilidad global de la categoría.

En cuanto a la distribución de los polígonos, hay que tener siempre presente las características de la imagen, (orientación, zonas sombreadas, pendientes, tipos de suelos, densidad de la vegetación) y su resolución, puesto que la variabilidad de una cubierta es directamente proporcional a la resolución de un sensor. Esto es debido a que cuando un sensor tiene una elevada resolución, más facilidad tiene de discriminar elementos que se encuentran dentro de un mismo tipo de cubierta, que, con un píxel de mayor tamaño, quedarían diluidos. Por lo tanto, al

contrario de lo que dicta la lógica, realizar una clasificación supervisada con sensores de una elevada resolución puede obtener unos resultados menos adecuados que si se emplean sensores con una reducida resolución, puesto que se aumenta la heterogeneidad de la imagen. Otro de los efectos que induce la resolución de la imagen radica en la frontera entre las clases. Mientras que con elevadas resoluciones se adquieren fronteras nítidas, en el caso de bajas resoluciones, las fronteras entre las diferentes coberturas del suelo se muestran borrosas, por la mezcla de coberturas en un mismo píxel.

En conclusión, para realizar una clasificación supervisada acertada, es importante definir correctamente las regiones de entrenamiento, preferentemente mediante un elevado número de polígonos distribuidos de manera homogénea en la imagen, apoyándose con el empleo de cartografía actual y/o imágenes aéreas de elevada resolución. En el caso de emplear imágenes multiespectrales, se deben emplear para la clasificación aquellas bandas que mejor representen la heterogeneidad entre las clases, así como emplear las plataformas satélite que ofrezcan productos con una resolución conveniente de acuerdo al estudio que se pretende realizar.

Combinación de ambas técnicas de clasificación:

En la conclusión del apartado 3.3.1, se ha comentado que la clasificación supervisada trata de realizar una clasificación de acuerdo a las categorías que el usuario desea obtener y la clasificación no supervisada trata de realizar una agrupación de acuerdo a la homogeneidad espectral presente en cada una de las clases.

Así pues, existe un método en el que ambos tipos de clasificaciones pueden ser combinadas. Esta metodología, emplea la clasificación no supervisada para definir el número de categorías que se pueden crear en una imagen de acuerdo a la homogeneidad de los ND de los píxeles que la componen. Se trata de una guía inicial para la clasificación no supervisada, que permite acotar los valores de ND de cada categoría, reduciendo la fase de entrenamiento.

Otra forma de combinar ambos métodos, consiste en aplicarlos de manera independiente sobre la misma imagen, para luego sintetizar la información que se ha extraído de cada uno de ellos. Se asume, que el método no supervisado permite mejorar la comprensión espectral, mientras que el supervisado permite obtener información de las clases informacionales. De esta manera, se puede aplicar el método no supervisado para clasificar aquellas zonas con una elevada homogeneidad espectral, empleando posteriormente la clasificación supervisada sobre aquellas zonas que no han podido ser clasificadas anteriormente.

3.4. PONDERACIÓN DE LA BONDAD DE CLASIFICACIÓN

Independientemente del método empleado para la clasificación de la imagen, resulta de especial interés evaluar de una forma científica la verificación de la calidad de la clasificación y la comprobación de la validez del producto creado. Esta se trata de la última fase enmarcada dentro del análisis de la imagen y permite al usuario valorar la clasificación de acuerdo a la realidad los resultados obtenidos, evitando los juicios de valor y estableciendo una metodología científica. Aun así, actualmente existen métodos subjetivos, en los que el usuario compara la clasificación obtenida con la verdad terreno y emite finalmente un juicio de valor. Este tipo de método, tiene ventajas principalmente económicas y de tiempo frente a otros métodos científicamente más rigurosos.

Métodos que son empleados en la actualidad con una menor subjetividad, consisten en consultar inventarios de la zona en la que se ha realizado el estudio, identificando de forma global los errores por comisión y por omisión, siendo por el carácter global de la comparativa imposible de localizar en que puntos ocurren los errores y cuáles son las categorías que mayor confusión presentan entre ellas. Otro de los métodos empleados que permiten obtener resultados de una forma relativamente rápida, consiste en emplear las regiones de entrenamiento, de las que se conocen las verdades terreno, como fuente de información con la que contrastar los resultados de la clasificación. Este método, sin embargo, proporciona unos valores de fidelidad mayores a los que se alcanzan en la realidad, puesto que los píxeles que se han empleado en la fase de

entrenamiento, tienen mayores posibilidades de haber sido clasificados correctamente por el algoritmo.

Finalmente, el método que ofrece una mayor fiabilidad a la hora de representar la calidad de la clasificación, se realiza a partir de la delimitación de muestras independientes no empleadas en la fase de entrenamiento, distribuidas en la imagen. Estas muestras deben ser representativas de la totalidad de la imagen, además de permitir establecer una medida estadística que relacione la clasificación con la verdad terreno. Sin embargo, emplear esta metodología supone un coste adicional en el proyecto, requiriéndose una inversión mayor de tiempo frente a los anteriores métodos. En contrapartida, esta metodología permite ofrecer unos resultados respaldados con solidez estadística.

Para realizar una evaluación de la fidelidad de la clasificación, se requiere de fuentes externas de información, producidas en el mismo instante o bien en un periodo de tiempo próximo al de la captura de la imagen satélite y que se consideren fidedignas a la realidad. Ordenando de forma cronológica, el proceso de verificación de los resultados se compone de las siguientes fases:

1. Diseño de los puntos de muestreo. En este apartado se define el tamaño mínimo de la muestra requerida y se establece el patrón con el que se distribuyen por la imagen.

2. Recolección de datos de verdad terreno en los puntos de muestreo definidos. Ya sea a partir de imágenes de elevada resolución, inventarios o salidas de campo, es menester encontrar información con la que poder contrastar las categorías definidas en la clasificación y la verdad terreno.

3. Comparación entre los datos definidos como verdad terreno y los puntos de muestreo, notificando las coincidencias y divergencias. En este apartado, es importante haber realizado una correcta georreferenciación de la imagen, cerciorándose de que los puntos que se comprueban en la imagen corresponden a la localización que adquieren en la realidad.

4. Evaluación de los errores encontrados y determinación de la fiabilidad. Con la confección de tablas realizadas en el apartado tres, es posible aplicar métodos estadísticos con los que evaluar la fiabilidad de la clasificación.

5. Crítica y análisis de la metodología empleada. Una vez determinada la calidad de la clasificación, siempre es conveniente realizar autocrítica e identificar si la metodología empleada fue la apropiada o si adoptando algunas variaciones se podrían haber conseguido mejores resultados.

Así pues, la fase de verificación de los resultados, trata de cuantificar e identificar los errores que se producen en la clasificación. Sin embargo, esta fase no está exenta posibles errores, puesto que se trata de un proceso complejo en el que interviene el usuario. Esta afirmación se demuestra cuando se pide a más de una persona que realice la fase de comprobación de la clasificación con la verdad terreno, ya que difícilmente obtendrán el mismo resultado. Para evitar este tipo de interpretaciones, es importante definir qué coberturas de la imagen corresponden a una misma clase informacional y cuáles no.

Entre las dificultades que se pueden hallar para realizar una correcta verificación, se encuentran aquellas debidas a las limitaciones del sensor, los métodos empleados por el usuario y la forma del territorio, en el que, debido a las sombras, pendientes y orientaciones, no se permita distinguir correctamente una clase de otra de una forma apropiada.

3.4.1. Fase de muestreo:

Se trata de la primera fase a realizar para verificar la bondad de la clasificación. El muestreo tiene la finalidad de, empleando una pequeña área de estudio, resultar representativo del conjunto. Un buen muestreo es aquel, que empleando el mínimo tamaño de la muestra, es capaz de extraer y representar la información que contiene la imagen de una forma global. La unidad de muestreo tiene referencia al elemento sobre el que se extrae la información. El mínimo elemento que se puede emplear se trata del píxel, aunque también se pueden emplear los

polígonos. La ventaja de emplear los polígonos radica en que la comparación entre la verdad terreno y la imagen clasificadas es menos sensible a una incorrecta georreferenciación.

En este sentido, una de las cuestiones sobre la que no se ha logrado unanimidad entre los especialistas más allá de que emplear las regiones de entrenamiento como puntos de muestreo ensalza la bondad de la clasificación de una forma artificial, es la forma en la que se deben distribuir los puntos de muestreo. A día de hoy, los métodos más empleados son los siguientes:

1. Aleatorio simple. Las muestras se reparten de forma aleatoria a lo largo de la imagen. Gracias a esta manera de distribuir la muestra, se consiguen unos resultados estadísticamente sólidos. Uno de los problemas que puede presentar este método radica en que las categorías de reducida extensión pueden no estar representadas de una forma adecuada. En la Imagen 14 se muestra una distribución aleatoria simple realizada para el entorno del campo de Cartagena.

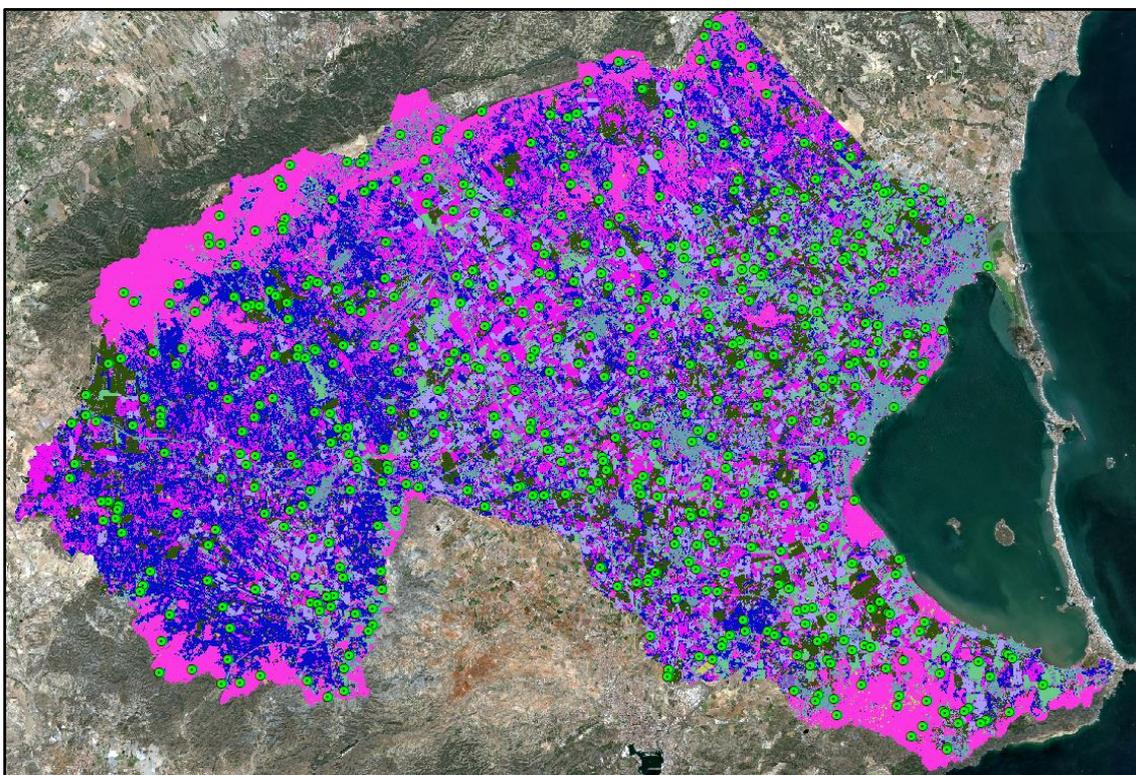


Imagen 14. Distribución aleatoria de muestras sobre la clasificación realizada en el campo de Cartagena. Imagen captada en mayo 2018 por el satélite Sentinel-2. Elaboración propia.

2. Aleatorio estratificado. Las muestras se reparten aleatoriamente de forma proporcional a la extensión de cada una de las clases. Este método trata de eliminar la inexactitud del método aleatorio simple cuando existen categorías reducida extensión.

3. Sistemático. Las muestras se distribuyen de una manera regular y sistemática a partir de un punto de origen. Permite verificar de una manera correcta las imágenes, aunque se trata de un método inexacto si se encuentran patrones en las mismas.

4. Sistemático no alineado. Garantiza una revisión completa del territorio, además de introducir una cierta aleatoriedad que reduce el sesgo debido a la periodicidad.

5. Por conglomerados. En vez de realizar un muestreo individual, este se realiza a partir de agrupaciones de puntos de muestreos a manera de conglomerados. Este método resulta más fácil de realizar que los anteriores, aunque los resultados que ofrece son normalmente menos preciosos.

De los cuatro primeros métodos expuestos anteriormente, son todos igualmente válidos, y su uso dependerá de las preferencias del usuario. Una vez se decide la distribución de la muestra, se ha de evaluar la tipología de variable que se estudia. Así, en el caso de variables continuas, como es el caso de temperatura, es indicado emplear métodos estadísticos continuos. Sin embargo, para las variables discretas, se pueden emplean métodos binomiales (acierto/error). Una vez se ha identificado el tipo de variable, el siguiente paso es identificar el tamaño de la muestra. Debido a que para la determinación de los usos del suelo únicamente se emplean va, a continuación, solamente se analizan las variables discretas.

3.4.2. Tamaño de la muestra:

El tamaño de la muestra se trata de un parámetro a definir muy importante dentro de la verificación de la imagen. ¿A partir de cuantos puntos de muestreo se consigue representar correctamente la imagen? ¿Qué nivel de acierto y error es aceptable? Son las preguntas que se deben de realizar antes de establecer el número de puntos mínimos de muestreo. Para el caso de una imagen clasificada (variables discretas), el número mínimo de muestras se establece de acuerdo a la Ec.17.

$$n = \frac{z^2 pq}{L^2} \quad Ec. 17$$

Dónde:

n indica el número mínimo de muestras que se deben establecer.

z representa la abscisa de la curva normal.

p y q se tratan del porcentaje mínimo de aciertos y de errores respectivamente.

L se trata del porcentaje de error máximo permitido en la estimación.

Para ejemplificar el cálculo del número mínimo de muestras, en el caso de requerir conocer con el 95% de probabilidad, con un porcentaje de acierto del 85% y un error máximo referente a la estimación permitido del 5%, se requieren 196 puntos de muestreo.

Aunque teóricamente una muestra compuesta por 196 puntos cumple con los requisitos del tamaño de muestra, este número puede no resultar representativo para la totalidad de la imagen, ya que puede tratarse de tamaño muy pequeño de píxeles evaluados si se compara el total de píxeles que conforman la imagen. Como consecuencia, diversos autores proponen que en las imágenes clasificadas se establezca un mínimo de cincuenta puntos de muestreo por cada categoría definida. Con esta metodología, en caso de definirse diez categorías, el tamaño mínimo adecuado del muestreo es de quinientos píxeles.

3.4.3. Elaboración de matrices de confusión:

Una vez se ha definido el tamaño y la distribución de la muestra, viene la fase de recogida de información y discriminación de los resultados obtenidos. En el caso de la clasificación de imágenes satélite, la información definida como verdad terreno, se compara con la clasificación realizada en los puntos de muestreo. Esta parte del proceso tiene un punto crítico y corresponde a la fase de georreferenciación de la imagen, ya que sin una correcta georreferenciación se pueden estar comparando superficies que no coinciden en el espacio. Un ejemplo de recogida de información, consiste en la búsqueda y empleo de imágenes de elevada resolución con fechas coincidentes o próximas de adquisición a la obtenida por satélite, en las que se distinguen nítidamente los diferentes elementos que componen la imagen o la realización de salidas de campo.

Previamente a la comparación entre la verdad terreno y el resultado obtenido por la clasificación, conviene definir previamente que elementos componen cada categoría, limitando de esta forma la subjetividad del usuario. Finalmente, definidos que elementos componen cada categoría, se está en disposición de establecer si el elemento que compone la cubierta corresponde a la categoría definida, o por el contrario no se ha clasificado satisfactoriamente.

Llegados a este punto, la comparativa entre la verdad terreno y la clasificación realizada permite elaborar una tabla en la que se identifican los errores y los aciertos de cada clase. Estas tablas son ampliamente empleadas por su capacidad de representar los errores producidos por omisión y comisión, permitiendo identificar los puntos de conflicto entre las diferentes categorías. A partir de la tabla creada, se pueden elaborar las denominadas como matrices de confusión. Adquieren este nombre porque permiten identificar los puntos de conflicto o confusión que se producen entre las diferentes categorías.

Una matriz de confusión se trata de una matriz cuadrada, en la que en la diagonal se confrontan el grado de acuerdo entre la clasificación en el mapa y la verdad terreno, mientras que en los extremos se muestran los datos marginales fruto del error de la clasificación. La relación entre los puntos bien asignados y el total de puntos, representa la fiabilidad global de la clasificación realizada.

En la Tabla 5, se muestra el ejemplo de una matriz de confusión elaborada en este proyecto para la clasificación en nueve categorías de una imagen Sentinel-2 captada en agosto de 2018.

Tabla 5. Matriz de confusión elaborada a partir de la clasificación de una imagen satélite en nueve categorías. En la diagonal el número de aciertos, en los extremos la confusión producida. Elaboración propia.

CLASES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Fiab. Usuario	Kappa
1	49	0	1	1	0	0	3	2	0	0,88	-
2	1	48	0	1	2	0	0	0	4	0,86	-
3	1	1	51	0	0	0	2	0	1	0,91	-
4	0	2	0	51	0	1	1	0	1	0,91	-
5	0	0	0	0	54	2	0	0	0	0,96	-
6	0	0	0	6	8	42	0	0	0	0,75	-
7	0	0	0	1	0	0	54	0	1	0,96	-
8	0	2	0	2	0	0	0	52	0	0,93	-
9	0	5	0	3	0	0	11	0	37	0,66	-
Total	51	58	52	65	64	45	71	54	44	-	-
Fiab. Prod.	0,96	0,83	0,98	0,78	0,84	0,93	0,76	0,96	0,84	0,87	-
Kappa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,85

Si se realizó la fase de entrenamiento de una manera apropiada, los diferentes solapamientos entre clases que se detectan en la matriz de confusión, se habrán detectado previamente. Los resultados obtenidos en la matriz de confusión corresponden en gran medida a la forma en la que se han creado las regiones de entrenamiento. De esta forma, con un aumento del porcentaje de píxeles de entrenamiento, sobre el total de los píxeles de la imagen, la matriz de confusión arroja un valor de clasificación mejor, es decir, se aumenta la calidad de la clasificación de la imagen conforme aumenta el número de píxeles destinados a las regiones de entrenamiento (Borràs, J., et al. 2017). Este hecho se ilustra en la Tabla 6, en la que en la columna %, indica el porcentaje de píxeles sobre el total de la imagen empleados para definir las regiones de entrenamiento y a continuación los valores correspondientes a la verificación de la clasificación. Se puede observar que, aunque el algoritmo empleado para la clasificación difiere (LDA, K_NN, Tree, RF...) la bondad de la clasificación aumenta conforme se aumenta el porcentaje de píxeles empleados para definir las regiones de entrenamiento.

Tabla 6. Evolución de la calidad de la clasificación con el aumento de la superficie de entrenamiento. Se observa un incremento de la precisión de la clasificación con el aumento del área destinada a entrenamiento. Fuente: Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2.

%	LDA	K-NN	Tree	RF	Comb.	Comb.	Comb.
						Sin LDA	Sin Tree
10	0,76	0,82	0,62	0,84	0,86	0,82	0,84
20	0,81	0,88	0,75	0,88	0,89	0,88	0,89
30	0,80	0,91	0,81	0,91	0,91	0,91	0,92
40	0,81	0,94	0,82	0,94	0,92	0,93	0,94
50	0,80	0,96	0,87	0,95	0,95	0,96	0,96

3.4.4. Elaboración de estadísticos:

Una vez completadas las matrices de confusión, son los métodos estadísticos los que ofrecen un valor de la fiabilidad de la clasificación. Entre ellos, destaca el empleo de la fiabilidad global, la fiabilidad del usuario y el estadístico kappa.

1. Fiabilidad global. Este valor se obtiene al realizar la suma de los valores situados en la diagonal de la matriz de confusión y dividirlos entre el global de número de muestras. Se trata del método más inmediato para obtener un valor representativo de la clasificación, pero en contrapartida no ofrece información individual de cada una de las categorías en las que se divide la imagen. Remitiéndose a la Tabla 5, la fiabilidad global de la clasificación adquiere el valor de 0,87; siendo 1 la correspondencia total entre la clasificación y la realidad.

2. Fiabilidad del usuario. Relacionado con la fiabilidad global, la fiabilidad del usuario permite identificar y cuantificar los errores que se producen por omisión o comisión en cada una de las categorías a partir de los datos marginales de la diagonal de la matriz de confusión. En la Tabla 5, la máxima fiabilidad se representa con el valor 1.

3. Estadístico Kappa. Este estadístico muestra la diferencia entre la realidad terreno y el resultado de la clasificación, eliminando la posibilidad de que existan píxeles clasificados correctamente debido al azar. De esta forma, el estadístico Kappa, no muestra la fiabilidad de la clasificación realizada, sino que trata de valorar la clasificación que se ha realizado de una forma correcta debido únicamente a la exactitud de la clasificación. Este estadístico se calcula a partir de la Ec.18, propuesta por Hudson y Ramn en 1987.

$$k = \frac{n \sum_{i=1,n} X_{i,i} - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{+i}} \quad Ec. 18$$

Dónde:

k indica el valor que adopta el estadístico [0-1].

n representa el tamaño de la muestra.

$X_{i,i}$ se trata del valor de acuerdo de la categoría i .

$X_{i+} X_{+i}$ se trata del acuerdo por omisión y comisión de la categoría i .

En la Tabla 5, el valor que adopta este estadístico es de 0,87, lo que significa, que la clasificación realizada es un 87% mejor de lo que cabe esperar si se realizase al azar. Un valor de 1 significa una correlación perfecta entre la realidad y la representación realizada en el mapa, mientras que un valor de 0, sugiere que la clasificación se ha realizado al azar. Este estadístico puede ser empleado en análisis multitemporales siempre que las imágenes empleadas tengan el mismo tamaño, tanto de píxeles como de muestras y número de categorías. En caso de no ser así, se debe reformular el estadístico y emplearse de manera que no existan distorsiones debidas al diferente número de categorías y/o tamaño de la imagen. (Congalton, R. B. 1985)

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1. DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se conoce como Campo de Cartagena a la cuenca vertiente al Mar Menor. Esta cuenca se trata de una extensa llanura de 1200Km², localizada en el Sur-Este de España, englobada en región administrativa de la Región de Murcia. Las precipitaciones son muy escasas, alrededor de los 300mm anuales repartidos a lo largo del año de una manera muy irregular. De esta forma, las ramblas y cursos de agua suelen estar completamente secos a lo largo del año, transportando agua únicamente en episodios intensos de precipitación que se producen principalmente en otoño. (Martínez Paz, J. M., et al. 2007).

Según la clasificación de la *Food and Agricultural Organization* (FAO), el clima de la Región de Murcia, se enmarca dentro de los climas mediterráneos, adquiriendo la denominación de mediterráneo seco. A grandes rasgos, este clima se trata de una transición entre el mediterráneo y el desértico, caracterizándose por la escasez de precipitaciones, temperaturas templadas en la mayor parte del año y veranos calurosos o muy calurosos, llegando en ocasiones a alcanzarse los 45°C.

Aunque el clima se encuentre influenciado por el Mar Mediterráneo, a nivel microclimático aparecen una serie de factores orográficos que condicionan notablemente el régimen climático. Así, las cordilleras Béticas, impiden la influencia de los vientos húmedos y frescos procedentes del Océano Atlántico, sometiendo a la Región de Murcia, que se encuentra a sotavento de las cordilleras Béticas a un intenso efecto Foëhn. Por el contrario, en el caso de los

vientos del este, la humedad que estos portan es retenida y elevada en las cordilleras, propiciando que la mayoría de eventos de precipitación se produzcan con este régimen de vientos.

Esta situación, provoca que las precipitaciones anuales se cuantifiquen alrededor de los 200 a 400 litros por metro cuadrado, siendo habitual que el déficit hídrico sea presente en la mayor parte del año. Para ilustrar esta realidad, se expone en la Tabla 7 un balance hídrico elaborado mediante el método de Thornthwaite empleado para el dimensionamiento de un tanque de tormenta en la localidad costera de San Javier. (Prointer Ingeniería, 2013).

Tabla 7. Balance hidrológico de la estación meteorológica San Javier aeropuerto, mediante el método de Thornthwaite. Fuente: Prointer Ingeniería. Elaboración propia.

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Anual
<i>T</i>	22,8	18,8	14,5	11,6	10,7	11,5	12,9	14,8	17,7	21,4	24,2	24,9	17,1
<i>P</i>	28,0	53,0	33,0	34,0	35,0	23,0	24,0	24,0	26,0	12,0	4,0	6,0	302,0
<i>ETP</i>	106,8	70,8	39,0	25,6	22,8	26,0	38,3	52,4	80,0	112,7	142,6	140,9	858,0
<i>R</i>	0,0	0,0	0,0	8,4	20,6	17,6	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
<i>ETR</i>	28,0	53,0	33,0	25,6	22,8	26,0	38,3	27,3	26,0	12,0	4,0	6,0	302,0
<i>DEF</i>	78,8	17,8	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,1	54,0	100,7	138,6	134,9	556,0
<i>EXC</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-

Dónde:

T: Temperatura media mensual en °C.

P: Precipitación media mensual en mm/m².

ETP: Evapotranspiración potencial, en mm/m².

R: Reserva. Equivale al almacenamiento de agua en el depósito suelo.

ETR: Evapotranspiración real, en mm/m².

DEF: Déficit medio mensual en mm/m².

EXC: Se trata del excedente.

Al analizarse la Tabla 7, se observa que únicamente en los meses de diciembre, enero y febrero, la precipitación es superior a la evapotranspiración potencial. Este hecho, permite que parte del agua que precipita se pueda acumular en el depósito suelo. Sin embargo, esta diferencia entre la evapotranspiración potencial y la precipitación, no es lo suficientemente grande como para que exista excedente en dichos meses, que permita al agua infiltrarse hacia el acuífero o formar parte de la escorrentía superficial.

En el resto de los meses del año, la evapotranspiración potencial es claramente superior a la precipitación, lo que se traduce en déficit hídrico. El máximo déficit, se produce en el mes de julio, cuando las precipitaciones medias de dicho mes son de 4 l/m² y la temperatura media diaria es de 24,2°C. Mediante este pequeño análisis, se expone la gran necesidad de regadío para los diferentes cultivos, sobre todo para aquellos cultivados en los meses de verano.

La zona del Campo de Cartagena, se ha caracterizado por la siembra de cultivos regadío, combinados con cultivos tradicionales de secano. Debido a la escasez de agua (véase Tabla 7), los recursos hídricos necesarios se han obtenido mediante la captación y explotación de aguas subterráneas, lo que ha conllevado a la sobreexplotación de los acuíferos de la zona. Sin embargo, desde la aprobación del trasvase Tajo-Segura, y la paulatina generalización del acceso al agua, los cultivos de la zona se han ido transformando, sustituyendo los cultivos de secano por cultivos intensivos de hortalizas en régimen de regadío. Este hecho ha permitido depender en menor medida de las captaciones subterráneas, resultando en un aumento de la infiltración hacia los acuíferos, permitiendo que su nivel piezométrico de estos aumente.

Debido a las malas prácticas agrarias, se han empleado fertilizantes en exceso generando un excedente que puede ser disuelto y transportado por el agua. Este excedente llega al Mar Menor a través del ciclo hidrológico de la cuenca, ya sea bien por infiltración en el acuífero cuaternario del campo de Cartagena o a través de escorrentía superficial en los grandes eventos de precipitación. La llegada de fertilizantes disueltos supone una problemática que amenaza con romper el equilibrio del ecosistema, causando procesos de eutrofización en el Mar Menor. (Martínez Paz, J. M., et al. 2007).

El Mar Menor es una laguna costera hipersalina, que con una extensión de 135 km², se alza como la mayor laguna salada del mediterráneo occidental. Se encuentra separado del Mar Mediterráneo por un cordón de arena de 24 km de longitud, denominado como La Manga y en su interior se erigen cinco islas de origen volcánico. El conjunto posee un gran valor ecológico y natural, siendo el hábitat de numerosas especies marinas y avícolas además de albergar en su fondo extensas praderas marinas.

El Mar Menor en su conjunto se incluye en la red Humedales de importancia internacional (RAMSAR). Su entorno constituye un sistema de humedales de especial importancia para las aves, en el que anidan e hibernan la gran mayoría de aves acuáticas de la Región de Murcia, erigiéndose para su protección dos Zonas de Especial Protección para Aves (ZEPA). Finalmente, el lugar también está considerado como un Lugar de Interés Comunitaria (LIC) y cuenta con la denominación de Parque Regional y Paisaje Protegido.

Económicamente, la región del Campo de Cartagena, se caracteriza por ser una zona donde convergen diferentes actividades socioeconómicas, destacando por su relevancia, las actividades agrícolas, el turismo, la construcción, la pesca y hasta el año 1990 la minería. Los impactos de todas estas actividades fuente de riqueza se han ido combinando, en mayor o menor relevancia, produciendo alteraciones en el medio natural.

Entre las principales alteraciones provocadas al entorno natural, destacan las acumulaciones de estériles mineros, originados por el lavado de minerales. En los episodios de precipitación, estos estériles pueden ser movilizados mediante escorrentía superficial hasta ser depositados en la cuenca receptora, además de ser susceptibles a deslizamientos de tierras.

Por su parte, el desarrollo turístico, focalizado principalmente en las orillas del Mar Menor, el Mar Mediterráneo y La Manga del Mar Menor a partir de mediados del siglo XX, ha acarreado un aumento desproporcionado de la superficie construida con una evidente falta de planificación y ordenación urbanística. La construcción y el desarrollo turístico han contribuido a aumentar la demanda de recursos y el vertido de residuos, sobredimensionándose las infraestructuras para hacer frente a la alta demanda estacional.

Con el aumento de la población y el turismo, se aumentan las actividades recreativas, deportivas y turísticas, que ejercen presión de manera desigual sobre la laguna. El hecho de que la interconexión de las aguas del Mar Menor con el Mar Mediterráneo sea escasa, limita el potencial de dilución de los residuos vertidos en la laguna. Además, los ruidos ocasionados, pueden influir negativamente en las especies avícolas presentes, principalmente en época de cría. (Gimenez Casalduero, M.F., et al. 2017).

Respecto a la agricultura, los métodos de cultivo han sufrido una gran transformación a lo largo del tiempo, cambiando los cultivos tradicionales de secano y hortalizas por el cultivo rotativo intensivo. Este tipo de agricultura se trata de una potencial fuente de contaminación de aguas superficiales y subterráneas, al estar asociada al empleo de fertilizantes y productos fitosanitarios. Debido al empleo excesivo de estos productos, muchos acuíferos europeos presentan una concentración excesiva de nitratos, por encima del límite máximo establecido por la Unión Europea (UE) de 50 mg/l. Los acuíferos afectados en la comarca del Campo de Cartagena son el Cuaternario y el Plioceno. (García Lindón, A. 2014)

En resumen, debido a la presión antropogénica sobre el entorno, recientemente se han producido episodios de eutrofización del Mar Menor. La eutrofización, es causada por una elevada concentración de nutrientes en el agua, principalmente Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) provenientes principalmente de la actividad agrícola y residencial. Estos nutrientes, además de reducir la calidad del agua, permiten a los organismos acuáticos vegetales desarrollarse abundantemente dando lugar a episodios de “bloom algae”, conocidos popularmente como “sopa verde”. En estos episodios, se dificulta la penetración de la radiación solar al fondo de la laguna y la oxigenación del agua, creando en última instancia, un entorno anóxico en el que los seres vivos padecen, acarreado la pérdida de biodiversidad en un entorno singular protegido. En consecuencia, la eutrofización es un fenómeno negativo que no ha afectado solamente a la biodiversidad, sino que también ha constituido una pérdida de atractivo turístico y económico proyectando una imagen negativa al exterior.

A la vista de la gravedad del problema, se han adoptado medidas urgentes con las que garantizar la sostenibilidad ambiental y realizar un seguimiento de la evolución de la zona afectada mediante la aprobación del **Decreto-Ley 1/2018, de 7 de febrero, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor** y el posterior **Plan de Gestión Integral de los Espacios Protegidos Mar Menor y Franja Litoral** en el que se definen acciones con las que reducir la entrada de nutrientes, tales como un manual de buenas prácticas agrarias o la instalación de tanques de tormenta, que retengan la carga contaminante proveniente del lavado inicial de las calles por el agua de escorrentía. Para la realización de este proyecto, se ha escogido el ámbito territorial definido por el Decreto-Ley 1/2018, mostrado en la Imagen 15, dado que se trata de la cuenca vertiente al Mar Menor y abarca la mayor parte del acuífero cuaternario.



Imagen 15. Ámbito territorial definido por el Decreto-Ley 1/2018, empleado para la realización del proyecto. Elaboración Propia.

Los límites externos se han elaborado a partir de los límites administrativos de la Región de Murcia y los fisiográficos de las cuencas vertientes al Mar Menor. En total, se han requerido de 6 tramos, que suman una longitud de 203,5 kilómetros. Por su parte, los límites internos están delimitados por el canal principal del transvase del Campo de Cartagena, la red viaria y los límites de las zonas cultivadas. En el decreto se definen tres zonas, coloreadas en la Imagen 15 de manera diferente: (Decreto-Ley nº1/2017).

La Zona 1, coloreada de amarillo, se trata de la zona que comprende las explotaciones agrícolas más cercanas a la laguna. Debido a la proximidad, en esta zona se establecen las condiciones más estrictas en cuanto al empleo de abonos y fitosanitarios, requiriéndose la plantación de barreras vegetales destinadas a la retención y regulación del agua de escorrentía. Además, los cultivos se deben de orientar de manera que se minimice la escorrentía hacia el Mar Menor.

La Zona 2, representada de color verde, se extiende por las zonas vulnerables del acuífero Cuaternario y Plioceno, a lo largo del área regable oriental del transvase Tajo-Segura y el límite de la Zona 1.

Finalmente, la Zona 3, representa el resto de la cuenca vertiente al Mar Menor.

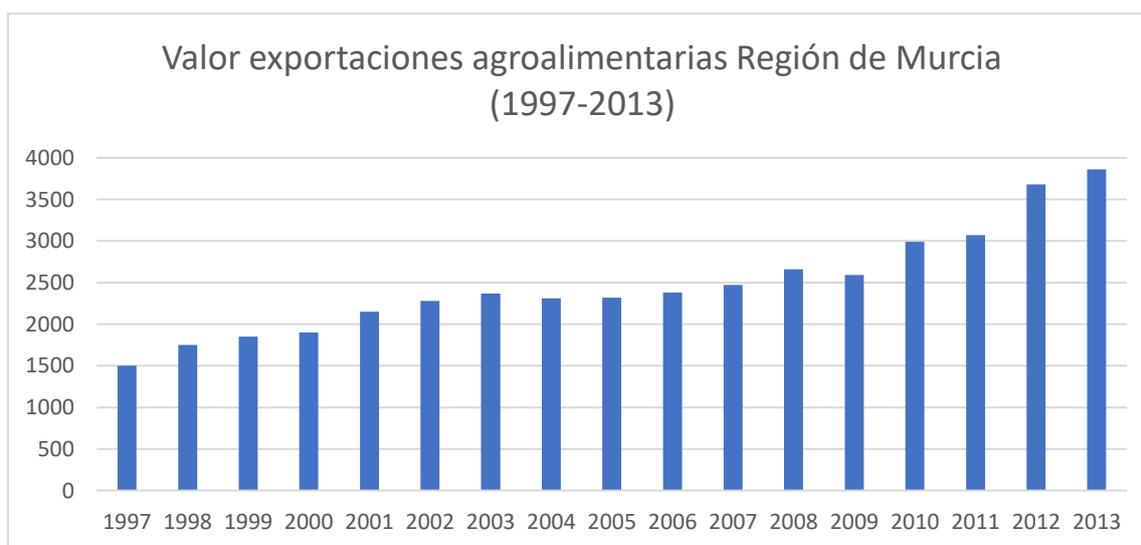
Una vez se ha definido el ámbito de estudio y sus principales características, se presenta a continuación una breve caracterización agrícola e hidrogeológica de la zona, dada la influencia de ambos parámetros en el desarrollo del modelo de Témez planteado.

4.2. CARACTERIZACIÓN AGRARIA

La agricultura se trata de una actividad económica relevante en la Región de Murcia y en concreto en el entorno del Campo de Cartagena. Para el presente proyecto, resulta de especial importancia lograr identificar de una manera acertada los diferentes cultivos que se presentan, puesto que cada uno de ellos se realiza en una época determinada del año y las necesidades hídricas y de fertilización varían con ellos.

Como muestra de la relevancia del sector en la Región de Murcia, según los datos ofrecidos por el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2013), el sector agroalimentario emplea en el año 2013 al 14% de la población activa de la Región de Murcia, frente al 6% de la media del territorio español. Las frutas y verduras cultivadas en la Región reciben solamente el 2,3% de las subvenciones estatales, mostrando de esta forma la elevada competitividad y especialización del sector. Además, las frutas y verduras producidas, disponen de una elevada cuota de mercado, representando el 70% regional, 30% nacional y 17% europeo.

Por su parte, el valor de las exportaciones del sector ha pasado de los 1500 millones de euros del año 1997 hasta los 3900 millones en el año 2013, lo que representa un crecimiento aproximado del 250%. La evolución detallada se muestra en la Gráfica 2.



Gráfica 2. Evolución del valor de las exportaciones agroalimentarias de la Región de Murcia, en millones de euros durante el periodo 1997-2013. Extraído de: García Lindón, A. 2014. Elaboración propia.

El aumento del valor de las exportaciones desde el año 1997, se explica por el aumento de la superficie regada, así como por la intensidad de cultivo. La disponibilidad de agua resulta imprescindible para el adecuado desarrollo vegetativo de los mismos y en una región semi-árida se trata de un recurso escaso. En las Tabla 8 y 9, se muestran las demandas y recursos estimados en hectómetros cúbicos (Hm³) presentados en el plan de cuenca por la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS).

Tabla 8. Estimación de demandas en la actualidad y en los diferentes horizontes futuros, de acuerdo al plan de cuenca de la Confederación Hidrográfica del Segura del 2015. Valores mostrados en Hm³.

<i>Demandas</i>	<i>Actualidad</i>	<i>Horizonte 2021</i>	<i>Horizonte 2027</i>	<i>Horizonte 2033</i>
<i>Urbana</i>	236	238	249	255
<i>Agraria</i>	1545	1545	1549	1549
<i>Industrial</i>	9	9	10	11
<i>Golf</i>	11	11	11	20
<i>Ecológica</i>	31	31	31	31
TOTALES	1834	1836	1852	1868

Tabla 9. Estimación de recursos en la actualidad y en los diferentes horizontes futuros, de acuerdo al plan de cuenca de la Confederación Hidrográfica del Segura del 2015. Valores mostrados en Hm³.

<i>Recursos</i>	<i>Actualidad</i>	<i>Horizonte 2021</i>	<i>Horizonte 2027</i>	<i>Horizonte 2033</i>
<i>Superficiales</i>	740	740	740	703
<i>Acuíferos</i>	94	94	94	94
<i>Costeros</i>	20	20	20	20
<i>Retornos</i>	144	148	164	165
<i>Ret. riego</i>	124	124	124	124
<i>Desal. riego</i>	96	126	126	126
<i>Desal. Ind.</i>	62	67	83	100
<i>Transvases</i>	322	322	322	322
TOTALES	1602	1641	1673	1654

Al analizar la Tabla 8, se observa que la demanda para riegos agrarios asciende a 1545 hm³, resultando un 86% de la demanda total de recursos hídricos. Por otra parte, en la Tabla 9 de recursos estimados, se observa que el retorno de riegos (Ret. Riego) tiene un valor de 144 hm³. Es decir, los riegos en la agricultura provocan una infiltración estimada de 144hm³ sobre los acuíferos de la confederación hidrográfica del Segura. Sin embargo, este valor no se distribuye homogéneamente a lo largo de la cuenca, sino que se concentra en las zonas en las que abundan los cultivos de regadío, como es el caso del Campo de Cartagena. En aquellas zonas y cultivos en los que no se hayan aplicado las adecuadas técnicas agrícolas, los retornos de regadío estarán acompañados de excedentes de nutrientes y productos fitosanitarios, provocando una merma de la calidad del agua subterránea.

El déficit de la cuenca, determinado al efectuar la diferencia entre recursos y demandas, se estima alrededor de los 200hm³ anuales, apreciándose que la demanda agraria se mantiene constante a lo largo de los diferentes horizontes, a pesar de la tendencia económica creciente mostrada en la Gráfica 2 y el incremento de la superficie regada. Esto se debe a la transformación de las técnicas de regadío, eliminando prácticamente el riego tradicional sustituyéndolo por riego localizado. Además del riego localizado, se están desarrollando e implementando nuevos métodos como el riego deficitario controlado, la fertirrigación, la automatización de los riegos, el empleo de variedades precoces, la hidroponía y el cultivo bajo invernaderos y acolchados, todos ellos orientados a maximizar la eficiencia hídrica. (García Lindón, A. 2014).

La presencia de nitrógeno en los acuíferos forma parte del ciclo natural del mismo, relacionado con el aporte de las precipitaciones y la fijación en el suelo del nitrógeno por parte de los organismos fotosintéticos. Sin embargo, en la actualidad se considera que la mayor proporción de nitrógeno presente en los acuíferos procede de origen agrario, debido principalmente a las técnicas del riego y abonado excesivo, afectando directamente la calidad de las aguas subterráneas.

Experiencias recientes por parte del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), en colaboración con la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM), han demostrado que, en los cultivos de lechuga del entorno del Campo de Cartagena, la concentración de nitratos en las infiltraciones oscila entre los 50 y 600 mg/L, obteniéndose un valor medio de 244mg/L. Suponiendo que los valores obtenidos para el cultivo de lechugas, fuesen extrapolables a otros tipos de cultivos hortícolas del Campo de Cartagena, el aporte de nitratos al acuífero cuaternario se cuantificaría alrededor de las 3300 toneladas año o lo que es equivalente a 20kg de N/ha/año de superficie regada.

Con la finalidad de reducir la contaminación provocada por los abonados y debido a la pluviometría irregular de la zona, se han establecido una serie de periodos de exclusión según el tipo de cultivo, en los que no se pueden realizar abonados nitrogenados. Los periodos de exclusión por cultivo se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Periodos de exclusión de abonado nitrogenado según cultivo. Fuente: Decreto-Ley nº1-2017, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad del Mar Menor.

TIPO DE CULTIVO	PERIODO DE EXCLUSIÓN
Cítricos	De noviembre a enero, ambos inclusive. En el caso de variedades sin recolectar se permite la aplicación de fertilizantes nitrogenados bajo prescripción técnica.
Frutales de hueso y de pepita	De caída de hoja a inicio de brotación
Uva de mesa	De diciembre a febrero ambos inclusive
Almendro	De noviembre a enero ambos inclusive
Vid	De noviembre a febrero ambos inclusive
Cereales	De junio a septiembre ambos inclusive
Hortícolas	Dadas las diversas alternativas y rotaciones de cultivo que se suceden en la Región de Murcia, no se pueden determinar periodos concretos con fechas precisas. No obstante, se establece un periodo mínimo de exclusión de tres meses al año, los cuales se pueden realizar en un solo ciclo o en varios.

Además de los periodos de exclusión planteados, para la aplicación de abonados nitrogenados en el entorno del Mar Menor, se han de seguir las siguientes medidas (Decreto-Ley nº1/2017):

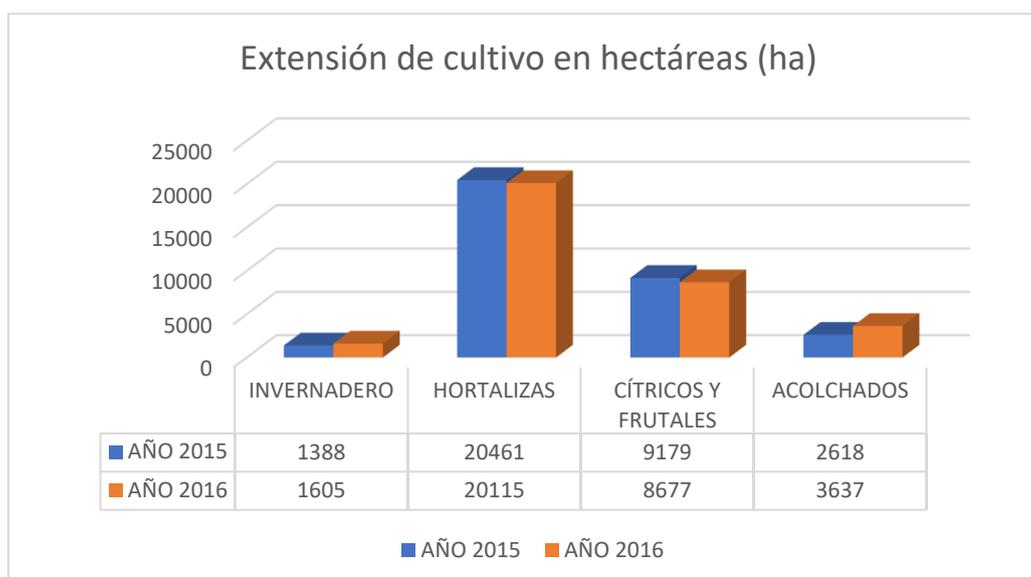
- Se garantiza que la aplicación de los compuestos nitrogenados se realiza fuera de periodos lluviosos y con una dosis ajustada a la capacidad de retención del suelo.
- Cuando se empleen purines o lodos, no se permite que el abonado produzca un encharcamiento de duración superior a 24h.
- En los cultivos de secano, se incorporará el compuesto al terreno a la vez que se realiza una labor, a poder ser, de forma posterior a un episodio de lluvias.
- Queda prohibida la aplicación de abonos en los márgenes y ribazos de las parcelas.
- El abonado nitrogenado se debe fraccionar cuantas veces sea posible, con la finalidad de asegurar que el cultivo es capaz de acceder a él y limitar de esta forma un excedente que sea susceptible a lixiviarse.
- No se encuentra permitida la aplicación de fertilizantes de manera directa desde cisternas sin la mediación de dispositivos de reparto. Tampoco se pueden abonar aquellos campos que se encuentren en barbecho.

Respecto a los principales cultivos realizados en el Campo de Cartagena, destacan por extensión aquellos de verduras y hortalizas, con una extensión aproximada de 20115 hectáreas el año 2016. Les siguen los cultivos de cítricos y frutales con 8677 hectáreas de extensión, los realizados sobre acolchados y los cultivados en invernadero con 3637 y 1605 hectáreas respectivamente.

Entre los cultivos de hortalizas, la lechuga ocupa la primera posición con 3979 hectáreas cultivadas, seguida de cerca por el cultivo de patata. Otras hortalizas y verduras cultivadas frecuentemente en el Campo de Cartagena son el melón y la sandía, la alcachofa, la coliflor, el brócoli y el pimiento. Estos cultivos representan el 88% de extensión de las 20115 hectáreas cultivadas de hortalizas el año 2016.

En los cultivos de cítricos y frutales destacan el limonero, naranjo y mandarino, con unas 7000 hectáreas de extensión, lo que corresponde al 80% de la extensión total. La extensión correspondiente a cultivos sobre acolchados, corresponde principalmente al cultivo del melón y la sandía, que se realiza de esta forma.

Finalmente, respecto a los cultivos realizados en invernadero, destaca el pimiento con 1149 hectáreas cultivadas, seguido por la siembra de calabaza, calabacín y tomate, con 143 y 102 hectáreas cultivadas respectivamente. En el Gráfico 3, se puede observar la extensión de cada tipo de cultivo en el año 2016 y su variación frente al año anterior. (Dirección General de Producciones y Mercados Agroalimentarios, 2017).



Gráfica 3. Extensión de los diferentes tipos de cultivos los años 2015 y 2016, en la comarca del Campo de Cartagena. Fuente: Dirección General de Producciones y Mercados Agroalimentarios.

4.3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La caracterización hidrogeológica de la zona de estudio resulta esencial para comprender el recorrido de los nitratos lixiviados hacia el sistema acuífero y las conexiones entre los diferentes sistemas. El relleno geológico del Campo de Cartagena se encuentra formado por materiales sedimentarios, con un espesor de hasta 1500 metros de profundidad. Estos materiales son principalmente margosos, es decir, de reducida permeabilidad, pero con intercalaciones de materiales de elevada permeabilidad, que dan lugar a acuíferos. Estos acuíferos han sido explotados de manera intensiva desde mediados del S.XX, y aunque la comprensión que se tienen de sus geometrías y de los parámetros hidráulicos se ha ido incrementado con el paso del tiempo, dada la complejidad de caracterizar correctamente la cuenca geológica, se suelen dar valores aproximados de acuerdo al conocimiento adquirido en cada momento.

Actualmente, en el Campo de Cartagena se han identificado cuatro formaciones permeables, separadas entre ellas por estratos de reducida permeabilidad. Clasificándolas desde techo hacia muro tienen el siguiente orden (García Aróstegui, J.L., Marín Arnaldos, F., Martínez Vicente, D., 2017):

1. Acuífero Cuaternario. Se trata de un acuífero superficial no confinado, de parámetros hidráulicos relativamente heterogéneos que se encuentra compuesto por gravas, arenas y arcillas.
2. Acuífero Plioceno, compuesto por de materiales sedimentarios, principalmente calcarenitas y conglomerados.
3. Acuífero Andaluciense, compuesto por calizas, conglomerados y calcarenitas.
4. Acuífero Tortoniense, constituido por conglomerados y areniscas.

Así pues, se puede considerar que en el Campo de Cartagena se encuentra un sistema acuífero multicapa, constituido por un acuífero libre y otros tres confinados. Existe, además, un quinto acuífero conocido como Triásico de las Victorias, formado por rocas carbonatadas y que aflora en el Cabezo Gordo. Este

acuífero apenas tiene interconexión con los anteriores cuatro y de tenerla, se produce con el acuífero Andaluciense. De esta forma, el acuífero Triásico de las Victorias se encuentra muy poco expuesto a las infiltraciones de origen agrícola y, por lo tanto, a la contaminación por nitratos de sus aguas. Representado mediante un perfil litológico, los terrenos situados sobre el Campo de Cartagena siguen generalmente la disposición mostrada en la Imagen 16. (Confederación Hidrográfica del Segura, 2015)

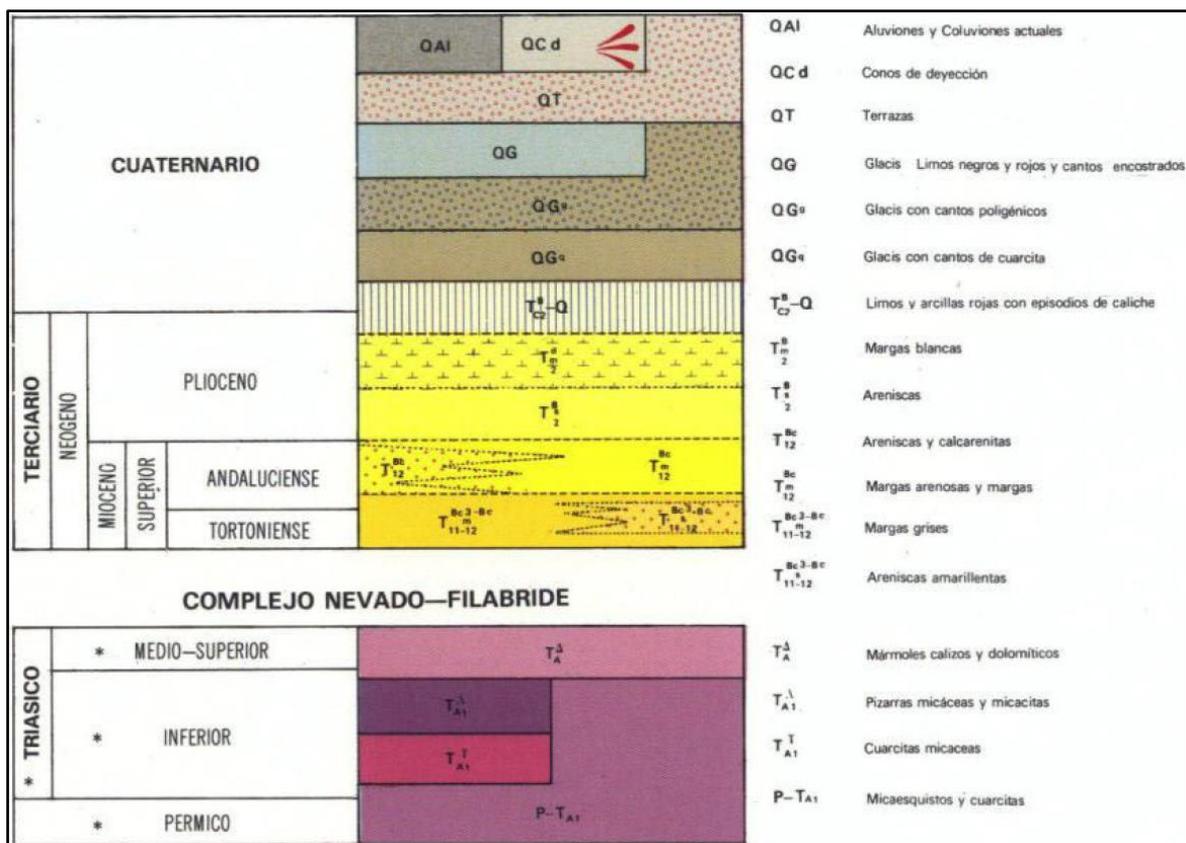


Imagen 16. Perfil litológico generalizado del entorno del Campo de Cartagena. Fuente: CHS 2015.

Para cuantificar las reservas de los acuíferos mencionados, es necesario conocer la extensión, el espesor y la porosidad eficaz, así como determinados parámetros hidráulicos. Se estima que el acuífero Cuaternario tiene un espesor medio saturado de unos 50 metros, extendiéndose superficialmente a lo largo del Campo de Cartagena, a excepción de algunos lugares en los que afloran los acuíferos confinados. La descarga del acuífero Cuaternario se produce en la franja litoral del Mar Mediterráneo y el contacto interior con el Mar Menor. En cuanto a la recarga, se estima que, en régimen natural, la infiltración se produce

únicamente a partir de la lluvia útil precipitada sobre el Campo de Cartagena, obteniéndose variaciones del nivel piezométrico correlacionadas con los periodos húmedos y secos. Actualmente, el acuífero no se encuentra en régimen natural, puesto que los cultivos de regadío que se realizan sobre él han aumentado las infiltraciones, debido a los retornos de riego. Las descargas por su parte, siguen ocurriendo en la franja litoral y el Mar Menor, además de las extracciones realizadas en los numerosos pozos existentes.

Por su parte, el acuífero plioceno presenta una extensión y espesor menores en comparación, alrededor de los 30 metros. Este se extiende de manera confinada hasta la Manga del Mar Menor, dónde los afloramientos volcánicos presentes funcionan como límite del mismo.

Aunque se considera que en el Campo de Cartagena existe un sistema multicapa, estando los acuíferos separados por estratos de reducida permeabilidad, lo cierto es que se ha identificado que la contaminación por nitratos que sufre el acuífero superficial, se ha reproducido en los acuíferos Plioceno y Andaluciense, existiendo por tanto comunicación entre los acuíferos. Entre los factores que incrementan la comunicación entre acuíferos, se encuentran los pozos mal construidos, que pueden llegar a comunicar los tres acuíferos o pozos abandonados.

Los retornos de riego que se efectúan sobre el acuífero cuaternario normalmente contienen nitrógeno. Se suele considerar que las actividades agrarias son la fuente de la mayor parte de los nitratos que llegan al acuífero, debido a las prácticas empleadas y su elevada extensión, aunque también pueden existir fuentes puntuales de contaminación, que repercutan intensamente sobre zonas localizadas. El empleo de fertilizantes resulta imprescindible para mejorar el rendimiento de los cultivos y ayuda a suplir la escasa presencia del nitrógeno en el suelo. Sin embargo, tal y como se ha comentado anteriormente, las prácticas inadecuadas, una deficiente planificación o un episodio de lluvia imprevisto, puede lixiviar el nitrógeno del suelo, arrastrándolo fuera del alcance de los cultivos y transportándolo hacia acuíferos y/o masas de aguas superficiales.

Dada la importancia de poder cuantificar la transferencia desde el acuífero cuaternario hacia los acuíferos inferiores puesto que este se encuentra contaminado, diversos autores han tratado de cuantificar las aportaciones y salidas de los acuíferos. Las principales estimaciones realizadas hasta la fecha se muestran en la Tabla 11. (García Aróstegui, et al. 2017).

Tabla 11. Estimaciones de balances en hm^3 entre los diferentes acuíferos del Campo de Cartagena. Fuente: García Aróstegui, et al. 2017. Elaboración propia.

Conceptos		IGME 1991		PHCS 2015-2021	Jiménez et al. (2016)	
		Cuaternario	Global (Cuaternario, Plioceno y Andaluciense)	Global (Cuaternario, Plioceno y Andaluciense)	Cuaternario	Global (Cuaternario, Plioceno Andaluciense y Triásico Victorias)
Entradas	Infiltración por lluvia útil	46	50	76	-	-
	Retornos procedentes de riego	23	0	18	-	-
	Total	69	50	94	112	112
Salidas	Bombes	2	21	88	¿	104
	Laterales al Mar (fundamentalmente al Mar Menor)	5	5	6	68	68
	A otros acuíferos	38	1	-	46	0
	Pérdidas	-	-	-	2	2
	Total	45	27	94	116	174
Balance		24	24	0	-4	-62
Observaciones		El balance positivo se traduce en importantes ascensos del nivel piezométrico en el Cuaternario que provocan problemas de drenaje en las zonas bajas.		Modelo equilibrado. Las descargas al mar también incluyen descargas ambientales ($1,19 \text{ hm}^3/\text{año}$).	Equilibrado en valor medio.	Sobreexplotación de acuífero Triásico-Victorias y determinadas partes del Andaluciense. En periodos de sequía debe incrementarse el bombeo en el acuífero cuaternario, ligado a desalobración.
PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE DESCARGA		Sobre una piezometría del año 2008 con gradiente de 3 por mil, una transmisividad de $48\text{m}^2/\text{día}$ y 29 km de frente costero.		Acepta el valor de IGME (1991).	Distribución de la recarga (obtenida por modelo hidrológico) entre descarga al Mar Menor (60%) y transferencia a acuíferos inferiores (40%), según artículos previos.	

Al analizar la Tabla 11, se observa en primer lugar una gran divergencia entre los estudios realizados en el 1991 por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) con los estudios más recientes. Como diferencias más significativas, en

primer lugar, se advierte que las entradas globales y las extracciones por bombeo contabilizadas sobre los acuíferos son superiores en los estudios más recientes. Sin embargo, a pesar del aumento de las entradas en las modelizaciones más actuales, se produce un cambio en el balance del sistema acuífero, pasando de un balance estimado plenamente positivo en 1991 a un modelo equilibrado o sobreexplotado en 2016.

Independientemente de las tendencias analizadas a partir de la Tabla 11 en cuanto al incremento de entradas y salidas, otro dato relevante es la dispersión existente entre los diferentes estudios que tratan de modelizar el funcionamiento del sistema acuífero del Campo de Cartagena. La divergencia entre los modelos permite apreciar la complejidad de realizar una estimación satisfactoria de los recursos, debido a la extensión y las características geotécnicas.

Esta complejidad resulta ligeramente inferior a la hora de estimar la escorrentía superficial producida en sobre el Campo de Cartagena y transportada por las ramblas, gracias a la existencia puntual de afloramientos. Respecto a los cursos superficiales en el Campo de Cartagena, el más destacado por su extensión y caudal en los episodios de lluvias intensas es la Rambla del Albuñón. Esta tiene una longitud de 42km y drena 44000 hectáreas, lo que corresponde a un tercio de la extensión total del Campo de Cartagena. La rambla desemboca en el Mar Menor, junto a la Marina del Carmolí. Los caudales medidos en la desembocadura se muestran en la Tabla 12. Martínez Paz, JM. et al. 2007.

Tabla 12. Evolución de los caudales medidos y la concentración de nutrientes en la desembocadura de la Rambla del Albuñón, teniendo de referencia periodos de precipitación húmedos y normales en la cuenca vertiente.

Fuente: Martínez Paz, JM. et al. 2007. Adaptación propia.

Régimen	Caudales (hm ³ /año)		Concentraciones (t/hm ³ /año)		
	Año Base	Año de Riada	Nutrientes presentes	Año base	Año riada
Drenaje	1	7	Nitrógeno	22,5	16,2
			Fósforo	10,0	7,6
Escorrentía	4	20	Nitrógeno	16,7	20,2
			Fósforo	5,3	6,3

Al analizarse la Tabla 12, se observa que, en el caso de producirse una pluviometría anual normal, la rambla vierte al Mar Menor 5hm^3 , de los que cuatro de ellos provienen de la escorrentía natural de la cuenca y uno es debido a los canales de drenaje agrícolas. En los años en los que se producen episodios torrenciales y la pluviometría anual se sitúa por encima de los valores medios, el vertido aumenta hasta los 27hm^3 , un valor cinco veces superior al considerado como normal. En cuanto a las concentraciones de nutrientes, se puede observar como en los años de riada estas se reducen. Sin embargo, hay que tener presente que, aunque la concentración disminuya, el aporte aumenta, debido al aumento de agua vertida. Finalmente, entre el agua procedente de los canales de drenaje agrícolas se encuentra generalmente una mayor concentración de fósforo y nitrógeno.

La escorrentía superficial de los otros 2/3 de extensión del Campo de Cartagena resulta muy difícil de evaluar. Existen numerosas ramblas y ramblizos que transcurren completamente secos durante el año y que solamente transportan agua en episodios concretos de precipitación que por intensidad y duración son capaces de generar la escorrentía necesaria. En la Imagen 17, se muestran todas las ramblas, ramblizos y canales existentes en el Campo de Cartagena. (Centro Nacional de Descargas, 2019)

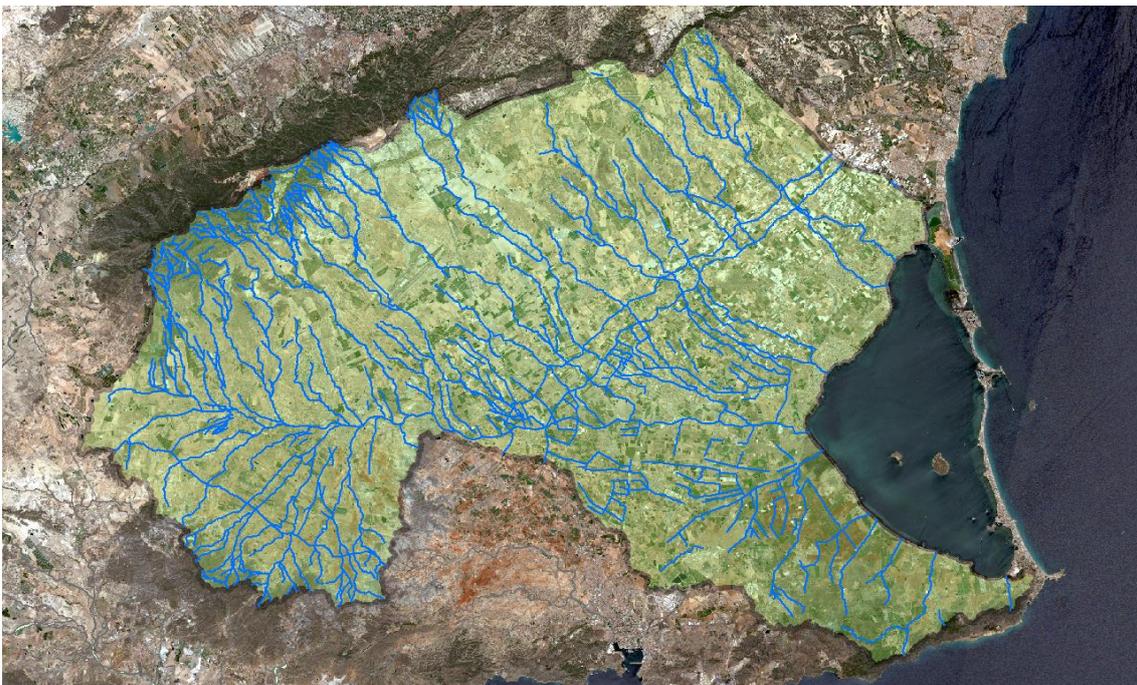


Imagen 17. Ramblas, ramblizos y canales presentes en el campo de Cartagena. Fuente: Centro Nacional de Descargas. Elaboración propia.

CAPÍTULO 5

FUENTES Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

El carácter multidisciplinar de este Trabajo Fin de Máster, en el que se aplican conocimientos hidrológicos, agrícolas, geológicos y geomáticos, ha hecho que el apartado de búsqueda y tratamiento de la información adquiera una gran relevancia, puesto que lograr unos datos de entrada fiables de acuerdo a las necesidades del proyecto resulta esencial para el correcto desarrollo del trabajo y estos no siempre se encuentran disponibles fácilmente. A partir de la revisión bibliográfica realizada, cronológicamente los requerimientos identificados para la adquisición de los datos se pueden sintetizar mediante los siguientes apartados:

1. Obtención de información geográfica y geomática. En este apartado destaca la búsqueda de imágenes satélite gratuitas y de fácil acceso. Estas deben representar adecuadamente la región de estudio además de disponer de una resolución temporal, espacial y radiométrica suficiente como para poder realizar con garantías una clasificación de los usos del suelo del Campo de Cartagena de acuerdo a las necesidades del modelo hidrológico empleado. Las imágenes que cumplen con los requerimientos establecidos son las obtenidas por los satélites Sentinel-2, proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA). Como apoyo durante el proceso de clasificación de las imágenes satélite, se requiere conocer la verdad terreno a través de imágenes de elevada resolución obtenidas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), además de los usos de parcelas declarados en catastro y planes de clasificación de los usos del suelo, como son el Corine Land Cover (CLC) y el Sistema de Información sobre la Ocupación del Suelo de España (SIOSE).

2. Información relativa a los cultivos realizados en el campo de Cartagena y su entorno. Con la determinación de los cultivos predominantes mediante la combinación de estadísticas y la clasificación de las imágenes satélite, posteriormente se puede caracterizar el aporte hídrico recomendado para su óptimo desarrollo en cada momento del año, así como las recomendaciones de fertilización y uso de productos fitosanitarios. Estos datos se obtienen a través del Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA).

3. Datos referentes a la meteorología, la geología y la hidrogeología de la zona de estudio. De acuerdo a la metodología empleada en el Libro Blanco del Agua para la evaluación de los recursos hídricos, se requieren una serie de variables adicionales, como son la precipitación y evapotranspiración, la permeabilidad de los materiales que conforman la zona y el coeficiente de rescisión del acuífero sobre el que se producen las infiltraciones. Los datos referentes a la meteorología de la zona de estudio, se han obtenido a través de las estaciones meteorológicas dispuestas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y otros organismos públicos, seleccionando solamente aquellas estaciones con un registro de datos superior a 15 años. Por su parte, los datos concernientes a la geología, es decir, los materiales que conforman el Campo de Cartagena, se han obtenido a través de las publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Finalmente, los parámetros que caracterizan el acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena se han obtenido de los datos disponibles por la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS).

4. Finalmente, para el tratamiento de la información, se han empleado programas específicos para el tratamiento y clasificación de las imágenes satélite, así como para la simulación numérica del modelo. Dichos programas han permitido automatizar el modelo de Témez, visualizar y analizar los resultados obtenidos.

A continuación, se muestran detalladamente los materiales empleados y sus características, con los criterios empleados para justificar su selección.

5.1. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SATÉLITE E INFORMACIÓN DE USOS DEL SUELO

La determinación de la cobertura del suelo resulta fundamental para estimar la capacidad de retención hídrica que este ofrece, siendo un parámetro de especial importancia a introducir en el modelo hidrológico de Témez. Debido a las necesidades particulares que se requieren en el estudio, como es la caracterización e identificación de las parcelas agrícolas en las que se realizan cultivos intensivos durante el periodo de un año hidrológico y los 1200 km² de extensión del Campo de Cartagena, hacen que los productos gratuitos disponibles que ofrecen información sobre los usos del suelo no resulten la mejor alternativa. Este hecho es debido a que los productos genéricos no logran la resolución temporal ni espacial deseada en este proyecto, por lo que, aunque estos logren determinar correctamente que una zona se destina al cultivo intensivo, no permiten detectar las fechas en las que se realizan las siembras y las cosechas o si una misma parcela se cultiva repetidamente a lo largo de un mismo año.

A la vista de los requerimientos, se ha determinado que la manera más adecuada de proceder consiste en producir de manera personal la información relacionada con la ocupación del suelo mediante la clasificación de imágenes satélite. Para la selección de las imágenes, se ha valorado la extensión de la zona de estudio, la periodicidad necesaria, la resolución de las imágenes tanto espacial como radiométricamente y la capacidad de discriminar adecuadamente las cubiertas vegetales. Además, estas tienen que ser gratuitas.

Entre los programas espaciales que cumplen con los requerimientos expuestos, sobresale el programa Copernicus, desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) conjuntamente con la Comisión Europea (CE). El programa cuenta con el desarrollo e implementación de siete misiones Sentinel, además de proveer un software específico para el tratamiento y análisis de las imágenes captadas. La inversión realizada en dicho programa alcanzará los 12 billones de euros en los próximos años y permite una monitorización global completa desde el espacio. (European Commission 2014).

De las siete misiones Sentinel, la que se destina a la monitorización de la superficie terrestre es la Sentinel-2. Esta se compone por dos satélites gemelos, el Sentinel-2A y el Sentinel-2B, que se encuentran equipados con un sensor multiespectral de 12 bandas, capaz de ofrecer una resolución espacial de 10 metros en las bandas visibles y el infrarrojo cercano. Esta resolución se reduce en el resto del espectro electromagnético, a 20 o 60 metros dependiendo de la banda seleccionada. La resolución temporal de cada satélite es de 10 días, es decir, se obtiene una imagen de la misma zona cada 10 días, aunque ese periodo se ve reducido a la mitad al existir dos satélites.

5.1.1. Obtención de las imágenes satélite:

La adquisición de las imágenes se ha realizado a través del portal Copernicus Open Access Hub, siendo el único requisito para acceder al contenido estar registrado en el sistema. La interfaz del portal permite seleccionar la misión de interés (en este caso Sentinel-2) y mediante un polígono la región de estudio, así como especificar el intervalo de tiempo para el que se desean las imágenes. Además, permite introducir el porcentaje de cobertura nubosa máxima permitida, mostrando únicamente aquellos resultados que tienen una nubosidad inferior.

Una vez se han cumplimentado los anteriores campos, se puede previsualizar la imagen que se pretende descargar, dando al usuario la potestad de verificar si la imagen cumple con sus requerimientos. Una vez realizadas las comprobaciones se prosigue con la descarga. Las imágenes se descargan en formato zip. y cada una tiene un peso aproximado de 1Gb.

El nombre del archivo descargado sigue una normativa estandarizada, dónde se indica la fecha y hora de la adquisición, el satélite que la realiza, el nivel de procesamiento del producto, el número de órbita y la cuadrícula en la que se encuentra la imagen. (European Space Agency, 2016).

Otra de las particularidades que presenta el programa, es la clasificación de las imágenes de acuerdo a su nivel de procesamiento. Se entiende como nivel de procesamiento al número de acciones que se han realizado sobre la imagen una vez esta ha sido captada por el sensor ubicado en el satélite.

Los niveles de procesamiento que se ofrecen en el portal de descarga son dos. El Nivel-1C indica que las imágenes se encuentran corregidas geométricamente, pero las reflectividades presentadas son las obtenidas sin tener en cuenta las distorsiones atmosféricas, conociéndose los productos como *Top of Atmosphere (TOA)*. El Nivel-2A se obtiene al corregir atmosféricamente las imágenes Nivel-1C, correspondiendo la reflectividad obtenida en estos productos a la existente sobre la superficie terrestre *Bottom of Atmosphere (BOA)*. Para alcanzar este nivel, en los comienzos del programa las imágenes Nivel 1-C se tenían que tratar digitalmente por el usuario mediante una extensión denominada como *sen2cor*. En la actualidad, para obtener niveles 2A de procesamiento de la imagen, el usuario puede seguir empleando este método o puede descargar la imagen ya tratada directamente desde el portal de descargas Open Access Hub. Las imágenes de ambos niveles de procesamiento se encuentran proyectadas sobre el sistema de coordenadas UTM/WGS84 y tienen una extensión aproximada de 100km². (European Space Agency, 2019).

Finalmente, se muestra un inventario de las imágenes descargadas con las que se ha realizado el proyecto. Debido a la extensión de la zona de estudio, para abarcar la totalidad del territorio se ha requerido descargar dos imágenes consecutivas por fecha que posteriormente se han unido y recortado. El procedimiento empleado se explica en profundidad en el Capítulo 6 dedicado a la metodología. La Tabla 13 muestra las fechas de captación de las imágenes empleadas por este proyecto.

Tabla 13. Número y fecha de adquisición de las imágenes empleadas en el trabajo.

Número de Imagen	Fecha de Adquisición
1-2	13/10/2017
3-4	12/11/2017
5-6	22/12/2017
7-8	21/01/2018
9-10	15/02/2018
11-12	22/03/2018
13-14	16/04/2018
15-16	16/05/2018
17-18	20/06/2018
19-20	15/07/2018
21-22	24/08/2018
23-24	23/09/2018

Como se puede observar en la Tabla 13, se han descargado un total de 24 imágenes satélite para llevar a cabo la clasificación de la zona de estudio. Además, se ha obtenido una imagen completa de la región de estudio cada mes durante un año hidrológico completo, sin existencia de nubosidad a excepción de la imagen correspondiente al mes de abril 2018. Finalmente, en el proceso de elección de las imágenes se ha perseguido que exista un espacio temporal similar entre ellas, estando todas ellas captadas próximas a mitad de mes.

5.1.2. Obtención de información referente a la ocupación del suelo:

La clasificación de los usos del suelo mediante imágenes multiespectrales se basa en la respuesta espectral única que ofrece cada elemento, asignando de una determinada respuesta espectral a un elemento en concreto. Para clasificar los cultivos que se hallan en una zona concreta, se requieren de muestras distribuidas a lo largo del área de estudio de las que se conozca el tipo de cultivo que representan. Estas muestras son conocidas como regiones de entrenamiento y resulta de especial importancia que se encuentren repartidas de manera homogénea a lo largo de la zona de estudio. (Mariana Belgiu y Ovidiu Csillik, 2018).

Debido a la resolución espacial que suelen ofrecer habitualmente las imágenes satélite, resulta difícil poder asegurar que tipo de superficie se encuentra representada en un punto en concreto, cuando existen similitudes entre ellas (reflectividad, textura, extensión... etc.). Para facilitar la tarea, además del conocimiento de la zona de estudio por parte del intérprete, existen diferentes opciones con las que poder determinar la verdad terreno sin necesidad de desplazarse personalmente. Entre las diferentes opciones destaca el uso de imágenes de elevada resolución de la zona de estudio, captadas simultáneamente o en un intervalo temporal próximo a las imágenes satélite. (Chuvieco, E. 2006).

En este proyecto se han empleado imágenes de elevada resolución realizadas por el Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA). El PNOA se encuentra cofinanciado por la Administración General del Estado y las diferentes Comunidades Autónomas y tiene como objetivo obtener imágenes de elevada

resolución del territorio español, con un periodo de actualización de 2 o 3 años. Para ello, las imágenes se captan mediante un vuelo fotogramétrico y son posteriormente tratadas de acuerdo a las especificaciones técnicas consensuadas entre los diferentes organismos.

Para este proyecto, se han descargado desde el Centro Nacional de Información Geográfica 9 imágenes de elevada resolución. Concretamente las pertenecientes a las hojas 933, 934, 935, 954, 955, 956, 976, 977, 978 del Mapa Topográfico Nacional 1:50.000 (MTN 50), captadas el verano del año 2018. Entre las principales características técnicas de estas ortofotos, destaca su elevada resolución espacial, de 25 centímetros. Estas se encuentran referenciadas en el sistema geodésico de referencia (ETRS 89) y se han realizado a una escala de vuelo 1:15000 (PNOA25). Finalmente, la generación de metadatos realizada de acuerdo a la normativa ISO19115:2003, permite que se puedan operar entre ellas.

Para asegurar la buena interpretación de las imágenes de alta resolución, también se ha obtenido acceso y consultado los programas de información de ocupación de usos del suelo SIOSE y CORINE LAND COVER. La información técnica detallada sobre ambos productos se encuentra en el Capítulo 2, en el apartado 2.3.3. referente a los usos del suelo. La descarga de los programas al igual que las ortofotos, se realiza a través del Centro Nacional de Información Geográfica. Los productos disponibles en dicho portal son completamente gratuitos y no es necesario registrarse, aunque se debe rellenar un pequeño cuestionario sobre los fines a los que se va a destinar el producto antes de proceder con la descarga.

Finalmente, como una fuente de información adicional sobre los usos del suelo, se ha consultado la información catastral de la zona. Acceder a esta información contiene relativa complejidad puesto que se requiere ser un usuario autorizado por la administración pública. Para proceder a la descarga catastral, en primer lugar, se han identificado los municipios que conforman la zona de estudio. Una vez han sido determinados se accede al apartado de descarga masiva de datos, momento en que el sistema requiere la identificación del usuario, por lo que es

necesario disponer de alguna de las formas de identificación personal mostradas en la Imagen 18 para proseguir con la descarga.

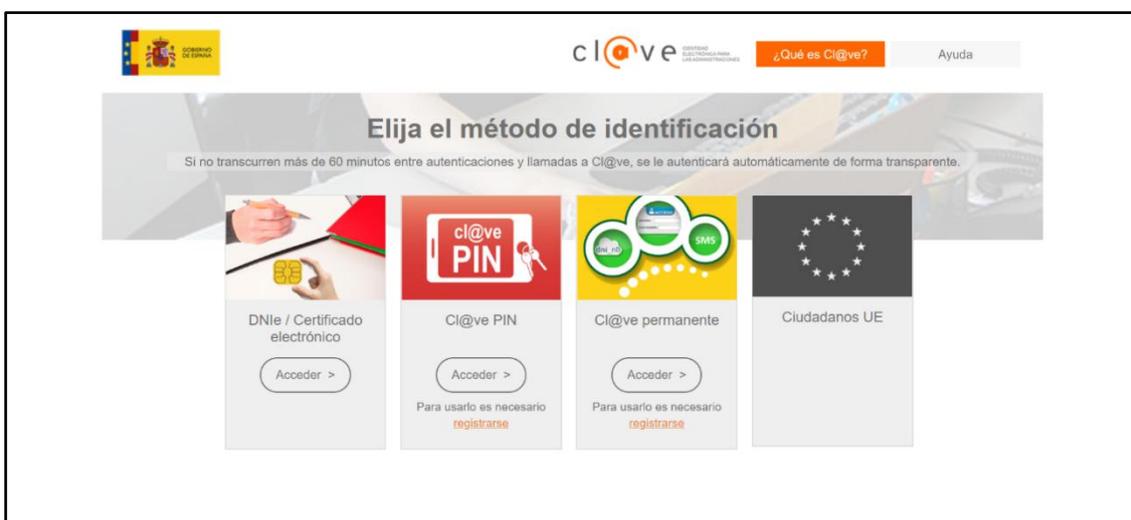


Imagen 18. Métodos de autenticación disponibles para acceder a información catastral. Elaboración propia.

Una vez se ha realizado la autenticación, la descarga de la información municipal se ha de realizar individualmente, seleccionando previamente la provincia de interés (Murcia), el municipio del que se desea descargar la información catastral (todos aquellos que componen el Campo de Cartagena) y finalmente la tipología del producto que se desea obtener (Rústica Sin Historia). Siguiendo la anterior ruta, entre todas las opciones de descarga que se descubren, debido a las necesidades del proyecto únicamente se seleccionan las siguientes:

- Parcelas catastrales.
- Descripción de los códigos de cultivo.
- Código de cultivo o aprovechamiento de cada subparcela de cultivo.
- Subparcelas de cultivo (Zonas de igual cultivo o aprovechamiento dentro de la parcela).

De esta manera, mediante la información catastral disponible, se logra conocer el uso declarado de las propiedades existentes en el Campo de Cartagena, constituyendo una fuente útil de información y de toma de decisión en caso de existir discrepancias entre las anteriores fuentes.

5.1.3. Modelos de elevación del terreno:

Los modelos de elevación del terreno tienen una gran importancia en la hidrología, puesto que permiten determinar la dirección y la acumulación del flujo, identificar las redes de drenaje, delimitar una cuenca a partir de un punto de salida, la división de una cuenca en subcuencas y el cálculo de las propiedades de la cuenca y de las redes de drenaje. (Burgos, V. H., & Salcedo, A. P. 2014).

Sin embargo, el modelo de Témez no necesita de una aplicación directa de un modelo de elevación del terreno, sino que el efecto de este se ve reflejado en el parámetro de excedente, de una manera global sobre la cuenca. Por otra parte, uno de los objetivos de este proyecto es el de determinar los valores de infiltración en la cuenca vertiente al Mar Menor, caracterizando principalmente la infiltración que se produce en zonas de cultivos hortícolas intensivos. De todas modos, por las múltiples aplicaciones sobre la hidrología superficial, se ha considerado interesante obtener un modelo de elevación del terreno, con el que poder en futuros estudios, por ejemplo, determinar la escorrentía mensual de una determinada subcuenca mediante el método de Témez que se aplica.

La descarga del modelo digital del terreno se ha obtenido a través del enlace <http://www.murcianatural.carm.es/natmur08/descarga.html>, de una manera gratuita. Las hojas cartográficas que se descargan son las 933, 934, 935, 954, 955, 956, 976, 977, teniendo los rásters descargados una resolución de 4x4m.

5.2. ADQUISICIÓN DE SERIES METEOROLÓGICAS Y DATOS ORIENTATIVOS DE REGADÍO

Las series meteorológicas para la elaboración del modelo hidrológico se han obtenido del Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA). El IMIDA se trata de un organismo público de investigación, que nace debido a las necesidades particulares de los sectores agrícolas y forestales del Sur-Este peninsular, encontrándose bajo la dirección de la Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente.

Debido al clima árido o semiárido del Sur-Este, los recursos hídricos constituyen un factor limitante para el desarrollo de cultivos, siendo por lo tanto necesario optimizar el regadío de estos. Para lograr este objetivo, integrado en el IMIDA se ha desarrollado el Sistema de Información Agrario de Murcia (SIAM). El SIAM cuenta con una red de 45 estaciones meteorológicas, dispuestas en zonas de regadío, cuyo objetivo es estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0) y de esta forma permitir conocer las necesidades de riego de los cultivos. De las 45 estaciones distribuidas, 29 de ellas pertenecen al IMIDA, 15 son del Ministerio de Agricultura y 1 de ellas pertenece a la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). Todas ellas se encuentran financiadas mediante fondos europeos. (Consejería de Agricultura y Agua, Región de Murcia).

Los parámetros que ofrecen las estaciones son la temperatura ($^{\circ}C$), la humedad relativa del aire (%), la radiación global incidente (w/m^2), la velocidad y dirección del viento (m/s), la precipitación (mm), el punto de rocío ($^{\circ}C$) y el déficit de presión de vapor (kPa). Una vez obtenidos los datos, estos se validan y almacenan en servidores, para ofrecerlos posteriormente de manera gratuita todos aquellos usuarios interesados a través del portal web www.siam.imida.es.

Además, la página permite elaborar informes personalizados, de acuerdo a las necesidades del usuario. A partir de los datos que se obtienen de las estaciones, se elaboran informes personalizados de acuerdo a la extensión temporal (año agrícola, hidrológico, diario u horario). Los datos permiten además confeccionar programas de riego y de fertilización de los cítricos, hortícolas y frutales más cultivados en la Región de Murcia.

De las 45 estaciones disponibles en el programa SIAM, para la realización de este proyecto se han obtenido los registros de precipitación y evapotranspiración de referencia (mm) de aquellas contenidas en la región de estudio o situadas en las proximidades, en total 18 estaciones mostradas en la Tabla 14. Sin embargo, no se han empleado los datos de todas ellas, puesto que las estaciones de La Morera y Los Belones se han puesto en servicio recientemente, sin disponer de series meteorológicas lo suficientemente extensas.

Tabla 14. Ubicación de las estaciones situadas en el entorno del Campo de Cartagena en coordenadas UTM-ETRS89.

NOMBRE	COORDENADA-X	COORDENADA-Y
EL CAMPILLO	655332	4173881
UPCT LAPALMA	680675	4173267
LA ALJORRA	670129	4171693
TORRE PACHECO	677368	4179725
TORRE BLANCA	685074	4182798
LOS INFIERNOS	682041	4188284
SANTIAGO LA RIBERA	691976	4184939
EL MIRADOR	686200	4191066
CORVERA	665200	4188754
CAÑADA DE SAN PEDRO	677062	4205239
LA ALBERCA	663907	4200807
SANGONERA LA VERDE	652257	4195930
LIBRILLA	648642	4195008
ALHAMA VALLE	639400	4183940
TOTANA	631023	4177172
BALSAPINTADA	664813	4179533
LA MORERA	643080	4164288
LOS BELONES	693847	4164941

Gracias a los informes personalizados del SIAM, se han descargado las necesidades hídricas de los cultivos del Campo de Cartagena. Los cultivos seleccionados, son aquellos de mayor extensión de acuerdo a la estadística de 2015-2016 (Pérez Hernández, F, et al. 2016). Respecto a las hortalizas, los cultivos seleccionados son: lechuga, brócoli, melón, patata y alcachofa. En relación a los cítricos, limonero, naranjo y mandarino. Finalmente, para invernadero y cultivo de acolchado, melón y pimiento.

5.3. COLECCIÓN DEL RESTO DE VARIABLES REQUERIDAS EN EL MODELO DE TÉMEZ

A parte de los usos del suelo, las series meteorológicas y la aportación hídrica provocada por los cultivos de regadío, el modelo de Téméz requiere el valor de infiltración máxima (I_{MAX}) determinado por la geología de la zona, el coeficiente de agotamiento del acuífero sobre el que se descargan las infiltraciones, en este caso el acuífero libre Cuaternario del campo de Cartagena y el excedente.

En primer lugar, la litología del Campo de Cartagena se ha obtenido partir de un proyecto realizado por D. Manuel Alcaraz Aparicio y D. Emilio Trigueros Tornero, a partir del Mapa Geológico Nacional (MAGNA) para la Comunidad Autónoma de Murcia (CARM). Los diferentes materiales identificados en dicho proyecto el Campo de Cartagena se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Litologías presentes en el Campo de Cartagena. Elaboración propia

LITOLOGÍA	EXTENSIÓN (HA)	% SOBRE TOTAL
GRAVAS	85042,01	69,98
MARGAS	11250,62	9,26
ARCILLAS	10804,83	8,89
CONGLOMERADOS	3781,59	3,11
ARENISCAS	2552,53	2,10
CALIZAS	2355,60	1,94
MICAESQUISTOS	2219,10	1,83
MARMOLES	971,45	0,80
FILITAS	627,90	0,52
GNEISES	434,73	0,36
DOLOMIAS	388,23	0,32
DACITAS	333,57	0,27
CUARCITAS	166,59	0,14
BASALTOS	158,14	0,13
ARGILITAS	127,13	0,10
YESOS	120,13	0,10
DIABASAS	109,17	0,09
SIN IDENTIFICAR	43,10	0,04
ARENAS	22,32	0,02
PIZARRAS	18,72	0,02
GRAUWACAS	2,59	0,00

Con un rápido análisis de la Tabla 15, se observa que la mayor extensión corresponde a materiales gravosos, con prácticamente un 70% sobre el total. Las gravas se tratan de materiales de elevada permeabilidad, por lo que es de esperar elevados valores de infiltración máxima en el conjunto del Campo de Cartagena. Los siguientes materiales con mayor extensión, son las margas y las arcillas con aproximadamente un 20% de extensión y en contraposición a las gravas, estos tienen valores de permeabilidad muy reducidos. Por lo tanto, es de esperar que en las dónde estas dos litologías estén presentes los valores de infiltración sean reducidos.

Otra vía alternativa para obtener la litología de la región de interés es consultando el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) que proporciona mapas geológicos de la diferentes Comunidades Autónomas, en caso de la Región de Murcia, a escala 1:200.000.

Respecto al coeficiente de agotamiento (α), este se trata de una constante propia de cada acuífero. El coeficiente caracteriza la ley exponencial de un manantial que concentra las descargas un acuífero en régimen no influenciado en el que sus reservas disminuyen como consecuencia de no registrarse entradas en el sistema. (IGME). Este valor se suele obtener a partir de la información proporcionada por las diferentes cuencas hidrográficas y posteriormente se suele ajustar mediante la calibración del modelo hidrológico a partir de los caudales obtenidos por aforos. (Patricia Olmos Giménez, 2012). En este proyecto, debido a la falta de aforos para la realización de la calibración del modelo, se ha empleado directamente el valor proporcionado para el acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena por el Libro Blanco del Agua, que es igual a $\alpha=0,02$ (mes^{-1}).

Finalmente, el coeficiente de excedente (C) de la cuenca también se ha obtenido a partir de los datos proporcionados por el Libro Blanco del Agua, en el que se asigna un valor de $C=0,3$ para todo tipo de cuencas. Sin embargo, otros autores proponen diferentes valores según el desarrollo de la cuenca, concretamente $C=0,3$ para cuencas altas; $C=0,35$ para cuencas con pendientes y desarrollo de red de drenaje y $C=0,5$ para cuencas desarrolladas ligadas a acuíferos detríticos y suelos muy desarrollados (Murillo, J. M. y Navarro, J. A., 2011).

5.4. PROGRAMAS INFORMÁTICOS EMPLEADOS

Para el tratamiento de la información y la obtención de resultados, en este proyecto se han empleado los programas Sentinel Application Platform (SNAP) y ArcGIS. El primero se trata de un software para el tratamiento de imágenes satélite y el otro es un sistema de información geográfica (SIG) presentando notables diferencias entre ellos:

-SNAP: Se trata de un software gratuito desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) dentro del programa espacial COPERNICUS. Por lo tanto, se trata de un software especializado en el procesamiento y análisis de imágenes geoespaciales. SNAP no procesa únicamente las imágenes del programa europeo, sino que se puede emplear con los principales programas de observación espacial, como el francés Spot o los americanos Landsat, Terra y Modis. Las cajas de herramientas que dispone están adoptadas para integrar nuevas funcionalidades desarrolladas por la comunidad científica, lo que permite en última instancia personalizar el programa de acuerdo a las necesidades del usuario. Debido a la gratuidad del producto, la posibilidad de desarrollo de herramientas por la comunidad científica, la posibilidad de personalizar el producto y las múltiples plataformas satélites que soporta, SNAP se trata de un referente mundial en cuanto a software de imágenes geoespaciales se refiere. Algunas de las principales novedades de SNAP frente al resto de software de procesamiento de imágenes geoespaciales son las siguientes (European Space Agency, 2019):

- Arquitectura común para todas las herramientas (Toolboxes).
- Rápida navegación y visualización de imágenes pesadas.
- Elaboración de gráficas a partir de las regiones de interés.
- Facilidad en la extensión de máscaras sobre la imagen.
- Re-proyección y orto-rectificación de precisión.
- Fácil gestión de las capas, permitiendo la importación de ESRI shapefiles y carga de servicios WMS.

-ArcGIS: A diferencia de SNAP, ArcGIS no se encuentra especializado en el tratamiento y procesamiento de imágenes geoespaciales. ArcGIS, se trata de un software especializado en la gestión de información geográfica. Distribuido y desarrollado por ESRI, entre las principales funcionalidades destacan la capacidad de agrupar, gestionar, administrar, tratar, compartir y distribuir información geográfica. Estas funcionalidades, además de los diferentes módulos que lo componen, permitieron que ArcGIS alcanzase una cuota de mercado estimada del 43% en el año 2015. (Alban, S. 2015).

Así pues, en la elaboración de este proyecto, se han combinado los dos programas informáticos dependiendo de las fases. En la fase inicial, en la que se han descargado, tratado y analizado las imágenes satélite, se ha empleado SNAP. Para la determinación de los usos del suelo y su clasificación, la elaboración del modelo hidrológico y la presentación de los resultados se ha empleado ArcGIS.

CAPÍTULO 6

METODOLOGÍA

En este capítulo dedicado a la metodología, se pretende exponer la línea de trabajo seguida para que cualquier usuario pueda reproducir los resultados obtenidos en este Trabajo Fin de Máster empleando los materiales y software enumerados en el Capítulo 5.

Para facilitar la comprensión del capítulo, este se ha dividido en dos bloques diferenciados, cada uno con subapartados ordenados de manera cronológica. El primer bloque está dedicado exclusivamente al proceso de clasificación de las imágenes satélite, la detección del cambio de los usos del suelo y la obtención de indicadores que muestren la calidad de la clasificación realizada. Por su parte, el segundo bloque se centra en exponer aquellas acciones destinadas a la confección del modelo hidrológico de Témez, como es la asignación de valores a las variables, la implementación de las ecuaciones en los Sistemas de Información Geográfica y la obtención de los resultados del modelo.

6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS USOS DEL SUELO

En este apartado se exponen todas aquellas acciones realizadas para clasificar los usos del suelo. Para ello, se parte con una breve definición de la región de estudio, el programa de teledetección empleado y finalmente el tratamiento, clasificación y análisis de las imágenes descargadas. Con la metodología que se describe, se obtiene la clasificación de los usos del suelo durante el año hidrológico 2017-2018 e indirectamente la evolución dinámica de estos. Las principales acciones para lograr este objetivo, se encuentran expuestas en los siguientes 9 apartados.

6.1.1. Definición de la región de estudio:

En este Trabajo Fin de Máster, se define la región de estudio como la cuenca vertiente al Mar Menor, comprendida administrativamente por los municipios de La Unión, Los Alcázares, San Javier, San Pedro del Pinatar, Torre Pacheco, Murcia, Fuente Álamo, Alhama de Murcia, Mazarrón y Cartagena. Los puntos que definen la superficie de la cuenca vertiente se han obtenido a partir del **Decreto-Ley 1/2018, de 7 de febrero, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor**. A partir de estos, se ha creado un shapefile con las tres zonas definidas en el Decreto-Ley, de acuerdo a la sensibilidad a los nitratos que presenta cada una.

La cuenca vertiente al Mar Menor tiene una extensión aproximada de 1200 Km² y la mayor parte de su territorio es llano. Por el norte, se encuentra limitada por la Sierra de Carrascoy, con una altura máxima de 1065 msnm y al sur por la Sierra de Cartagena-La Unión y Cabo Tiñoso, La Muela y el Roldán. Existe en el término municipal de Torre-Pacheco el Cabezo Gordo, un monte de reducida extensión con una altura de 312msnm. La imagen 19 muestra el relieve de la zona de estudio.

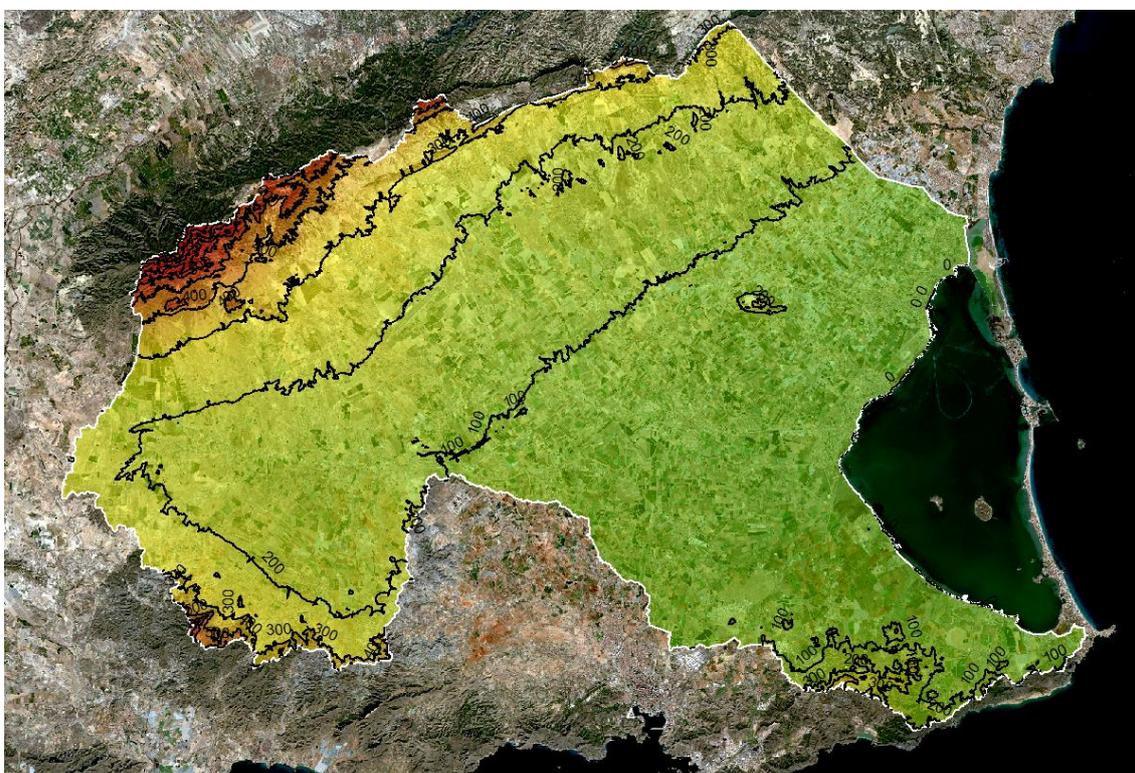


Imagen 19. Relieve topográfico del Campo de Cartagena. Los colores rojizos indican una mayor altitud. Intervalo de 100m entre curvas de nivel. Elaboración propia.

En cuanto a las características climáticas, la zona adquiere la clasificación de mediterráneo seco, con precipitaciones alrededor de los 300 l/m², que se distribuyen irregularmente a lo largo del año, concentrándose la mayor parte de ellas en episodios de elevada intensidad y corta duración durante el periodo otoñal. Este hecho provoca que los cursos de agua tengan una elevada estacionalidad, permaneciendo secos la mayor parte del año. Se registran temperaturas medias templadas a lo largo del año, registrándose veranos calurosos o muy calurosos, en los que se llegan a alcanzar los 45°C. (Martínez Paz, J. M., et al. 2007).

6.1.2. Características de las imágenes:

Para realizar un análisis multitemporal o simplemente analizar una imagen satélite con garantías, es imprescindible realizar sobre el producto obtenido una serie de correcciones y calibraciones, destinadas a eliminar las distorsiones geométricas, radiométricas y/o el ruido causado por un posible funcionamiento anómalo del sensor. Es por ello, que previamente a realizar cualquier operación sobre los productos descargados, se ha de realizar una pequeña revisión bibliográfica con la que identificar sus características y, por lo tanto, identificar las operaciones necesarias para obtener una imagen corregida.

Como se ha expuesto en el Capítulo 5, la descarga de las imágenes se ha realizado a partir del portal Open Access Hub, seleccionando aquellas con un porcentaje de nubosidad inferior al 10%. La nomenclatura necesaria para la identificación de la imagen de interés se encuentra estandarizada mediante el *Naming Convention* de la Agencia Espacial Europea.

Desde el inicio de la misión Sentinel-2, el portal Open Access Hub ha estado ofreciendo productos con un nivel de procesamiento 1C, que corresponde a imágenes con una extensión de 100x100km², georreferenciadas y proyectadas en el sistema de coordenadas WGS84. Se entiende como nivel de procesamiento a la nomenclatura empleada por la ESA para indicar el tratamiento digital al que se ha sometido previamente una imagen, adoptado con

la intención de estandarizar e informar al usuario sobre las correcciones efectuadas (European Space Agency, 2016).

Según el tratamiento digital efectuado sobre la imagen, los niveles de procesamiento se ordenan de manera creciente conforme más operaciones se han realizado. El Nivel 0 corresponde al estado más bajo de procesamiento que puede adoptar una imagen, alcanzado en el momento que la superficie terrestre es captada en forma de bits por el sensor espacial y se transmite hasta centros de almacenamientos de datos. El mayor nivel de procesamiento que puede adquirir una imagen es el Nivel 2A, que se alcanza cuando a la imagen se le han aplicado todas las correcciones. De esta manera, los datos que parten desde el Nivel 0, pueden alcanzar el Nivel 2A, mediante transformaciones realizadas por algoritmos, pero resulta imposible que desde un nivel superior la imagen adquiera un nivel inferior, dado que la información original se transforma y se hace irrecuperable. A continuación, se exponen brevemente los diferentes niveles de procesamiento y las correcciones aplicadas en cada uno de ellos para alcanzar un producto 2A. (Sentinel User Handbook and Exploitation Tools, 2015).

6.1.2.1. Nivel 0 de Procesamiento:

En esta etapa se analiza el funcionamiento del sensor y se comprueban los archivos auxiliares con la finalidad de detectar anomalías. Finalmente, se data la información recibida y se extrae una imagen de baja resolución que se comprueba visualmente.

6.1.2.2. Nivel 1 de Procesamiento:

Este nivel surge con la descompresión de los productos de Nivel 0 y en él se aplican las primeras correcciones sobre la imagen. Según el alcance de las correcciones aplicadas, este se divide en los niveles 1A, 1B y 1C.

- **El Nivel 1A** surge con la descompresión del Nivel 0 sin que se haya realizado ninguna corrección previa. En este nivel se puede visualizar la imagen al completo y realizar combinaciones de bandas, aunque no

se cuente con un sistema de referencia y los valores de reflectividad asignados a los píxeles (ND) pueden carecer de veracidad.

- **En el Nivel 1B** se aplican las primeras correcciones radiométricas, con las que se restauran píxeles y líneas perdidas, se identifican los valores de reflectividad que sobresalen de la media y se elimina el ruido de aquellas bandas con elevada resolución espacial. Después de las correcciones, a la imagen se la dota de un sistema geográfico de referencia (WGS84), se establecen puntos de control con coordenadas conocidas y se le adjunta una rejilla geográfica. Con la realización de este último paso, la imagen se comprime y se transfiere para que se realicen las siguientes operaciones.
- **Nivel 1C.** En este nivel el producto obtenido está compuesto por imágenes de 100km² de extensión, proyectadas en el sistema de referencia UTM/WGS84. La reflectividad de los píxeles corresponde a la obtenida en el techo de la atmósfera (TOA), aunque con todos los parámetros ajustados para transformarlos en radiancias. Los productos Nivel-1C presentan una corrección geométrica empleando modelos digitales de elevación (DEM). Adicionalmente, estos productos incluyen una clasificación agua/terreno, el cálculo de máscaras de nubosidad e información del Centro de Predicción Meteorológica Europeo (ECMWF), que incluye la columna total de ozono y vapor de agua y la presión atmosférica a nivel de mar.

6.1.2.3. Nivel 2A de Procesamiento:

Se trata del máximo nivel de procesamiento alcanzable. Procede de los productos Nivel-1C, en los que al efectuarse las correcciones atmosféricas se obtiene una imagen dotada con las reflectancias de la superficie terrestre (BOA). Al tratarse de los niveles de reflectividad de la superficie terrestre, este producto establece las condiciones para que se puedan realizar análisis multitemporales o clasificaciones de la superficie, puesto que las variaciones radiométricas en diferentes espacios temporales de un mismo punto, corresponden únicamente a

la variación de la superficie terrestre y no a las condiciones atmosféricas. Un método con el que realizar el tratamiento de las imágenes Nivel-1C y obtener productos Nivel-2A, es a través de las herramientas del software SNAP, mediante el módulo sen2cor. Este módulo aplica cuatro algoritmos diferentes sobre los productos Nivel-1C, obteniendo imágenes corregidas atmosféricamente. Las principales distorsiones que se corrigen con el módulo son las siguientes:

- 1. Eliminación de las distorsiones provocadas por los cirrus:** Los cirrus son nubes altas que pueden ser detectadas en las imágenes multiespectrales alrededor de los 1380nm del espectro electromagnético. Aprovechando esta propiedad, se emplea un algoritmo a partir de la (Ec.19) que permite estimar la reflectividad de la superficie terrestre sin la interferencia de los cirrus (Rudolf Richter, Xingjuan Wang, Martin BachMann, 2011).

$$p_v(\gamma) = \frac{p^*(\gamma) - p_c(\gamma)}{T_c(\gamma)} \quad \text{Ec. 19}$$

Dónde $p_v(\gamma)$ es la reflectividad sin la presencia de cirrus.

$p^*(\gamma)$ representa la reflectividad en el techo de la atmósfera.

$p_c(\gamma)$ es la diferencia de reflectividad provocada por cirrus.

$T_c(\gamma)$ muestra la transmisividad de los cirrus.

(γ) es el centro del ancho de la banda de observación.

- 2. Corrección de los aerosoles:** Los aerosoles presentes en la atmosfera representan una fuente de distorsión de las imágenes satélite, provocando que estas obtengan una mayor transparencia. Para mitigar el efecto, se emplea el algoritmo Dense Dark Vegetation (DDV), que relaciona la reflectividad del infrarrojo lejano con las bandas 4 y 2 (rojo y azul). (X. Q. Zhang, L. P. Yang, Y. Yamaguchi 2010).

Para poder aplicar el algoritmo, se requieren de áreas en la imagen en las que se conozca la reflectividad. Estas zonas corresponden a masas de agua debido a sus propiedades electromagnéticas, ya que el agua absorbe la totalidad de la radiación incidente, pudiendo considerarse que las masas de agua tienen una reflectividad nula. Mediante estas propiedades, el algoritmo logra identificar y cuantificar los aerosoles presentes entre el sensor y la superficie terrestre, corrigiendo su efecto.

- 3. Vapor de agua:** Correcciones empleadas para la eliminación de los efectos provocados por el vapor de agua de la columna atmosférica, parten del algoritmo Atmospheric Pre-Corrected Differential Absorption (APDA) desarrollado para imágenes del satélite Aviris (Ec. 20). Schläpfer, D., Borel, C. C., & Keller, J. (1996).

La Ec.20 se emplea sobre las bandas B8a y B9 del satélite Sentinel-2. Se aplica sobre la banda B8a porque esta constituye una ventana atmosférica y la banda B9 permite cuantificar la absorción atmosférica.

$$R_{APDA} = \frac{L_m - L_{atm}}{LIR([Y_R], [L_R - L_{atm}])} \quad Ec. 20$$

Dónde L_m representa el valor medio de la reflectancia del canal.

L_{atm} muestra la media de la reflectividad atmosférica.

LIR es una regresión lineal entre las bandas empleadas.

Como se ha mostrado, sen2cor se trata de una herramienta potente que permite realizar las correcciones atmosféricas sobre las imágenes Nivel-1C. Para la realización de este proyecto, se han empleado imágenes Nivel-2A disponibles en el portal Open Access Hub por lo que no ha resultado necesario emplear el módulo sen2cor en ellas. Sin embargo, se ha empleado puntualmente para

verificar que los valores de reflectividad de una imagen Nivel-2A descargada directamente desde el portal coincidan con los de la misma imagen descargada en Nivel-1C y posteriormente tratada con sen2cor.

6.1.3. Pretratamiento de las imágenes:

En este apartado se exponen las acciones previas a la clasificación de la imagen, que incluye en orden cronológico, la homogeneización de las bandas, el composite y mosaico de las imágenes y el recorte de la zona de estudio. Por el contrario, no se incluyen las correcciones atmosféricas, que se encuentran mencionadas en el apartado 6.1.2 correspondiente a las características de las imágenes empleadas, puesto que se han empleado imágenes previamente corregidas atmosféricamente.

- **Homogenización de bandas:** El satélite Sentinel-2 capta parte del espectro electromagnético y lo discretiza en 13 bandas. La clasificación de estas a partir de una mayor frecuencia de onda se inicia en el azul y finaliza en el infrarrojo lejano. Estas bandas radiométricas no cuentan con la misma resolución espacial, teniendo cuatro de ellas una resolución de 10m, seis una resolución de 20m y las tres restantes una resolución de 60m. Para poder realizar operaciones entre bandas de diferentes resoluciones es necesario homogeneizar la resolución espacial de todas ellas, estableciendo la resolución deseada. Para este proceso se ha empleado la función Resampling, integrada en el software SNAP siguiendo la ruta:

Raster→Geometric Operations→Resampling

De esta forma, se han homogeneizado las 12 bandas ofrecidas por el satélite a la resolución máxima disponible de 10 metros. En este caso, cuando se requiere de una resolución mayor que la proporcionada por la banda, la función resampling, divide los píxeles. La división de los píxeles conlleva un aumento del número total de los píxeles que conforman la imagen, pero no produce ningún aumento de información, aumentándose únicamente el peso del archivo. Para ilustrar el funcionamiento, al pasar de un píxel con una resolución de 20m de lado a otro de 10m de lado, la función resample crea 4 nuevos píxeles a partir de

cada píxel original con idéntico valor a este. En el caso contrario (paso de 10m a 20m), la función toma el ND de los cuatro píxeles, calcula el promedio y funde los cuatro píxeles en uno. Este proceso conlleva pérdida de información, puesto que el valor original de cada píxel es irrecuperable, pero se trata de un método a tener presente cuando se requieran realizar cálculos complejos o que no requieran gran precisión, puesto que el tamaño de la información disminuye y por lo tanto el consumo de tiempo y recursos.

-Composite y mosaic: Al tratarse de imágenes multiespectrales, cada banda se encuentra representada por un archivo, que tiene la extensión .jp2. A partir de estos archivos se pueden realizar las combinaciones de bandas. Sin embargo, el objetivo es que cada píxel de la imagen contenga toda la información radiométrica que proporciona el satélite. Para ello, se ha empleado la función *Composite Bands* del software ArcGis. Esta función crea un único ráster a partir de múltiples bandas utilizándose especialmente con imágenes multiespectrales. El input de la herramienta son todas las bandas homogeneizadas que componen la imagen, y el output es un archivo único con el nombre Mosaic, con extensión .img. Este proceso se repite para cada una de las imágenes que componen la zona de estudio, con una frecuencia mensual.

Una vez se ha obtenido el composite de las dos imágenes que componen la zona de estudio, se procede a unirlos, mediante la herramienta *Mosaic to New Raster*. Realizar un mosaico de las imágenes resulta de utilidad cuando se requiere fusionar dos o más rásters o datasets. La herramienta permite además minimizar los cambios que se producen entre los diferentes rásters superpuestos, creando un nuevo ráster de salida con la unión de ambos. Los parámetros que se han empleado en con la herramienta Mosaic se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Parámetros escogidos para la unión de los rásters. Elaboración propia.

Input:	Dos rásters mensuales	Raster dataset name with extension:	Mosaic.img
Output:	Directorio de destino	Spatial reference:	WGS1984/UTM
Pixel type:	16bit unsigned (aunque se puede utilizar 8bit unsigned)	Cell size:	10m
Number of bands:	12	Mosaic Operator:	Last
Mosaic color map mode:	First		

-Recorte de la zona de estudio: Una vez se ha realizado el mosaico de las dos imágenes, se obtiene un producto 20000km². La zona de estudio tiene una extensión total de 1215km², lo que representa aproximadamente el 6% del mosaico original. Debido a este hecho, se hace necesario realizar un recorte de la zona de estudio, con la finalidad de reducir el peso del archivo, facilitar la visualización y aumentar la velocidad de los cálculos. Para ello, se emplea la herramienta *Clip* de ArcMap y el *shapefile* obtenido en el apartado 6.1.1 a partir del Decreto Ley 1/2018 correspondiente a la cuenca vertiente al Mar Menor. El resultado obtenido se muestra en la Imagen 20.

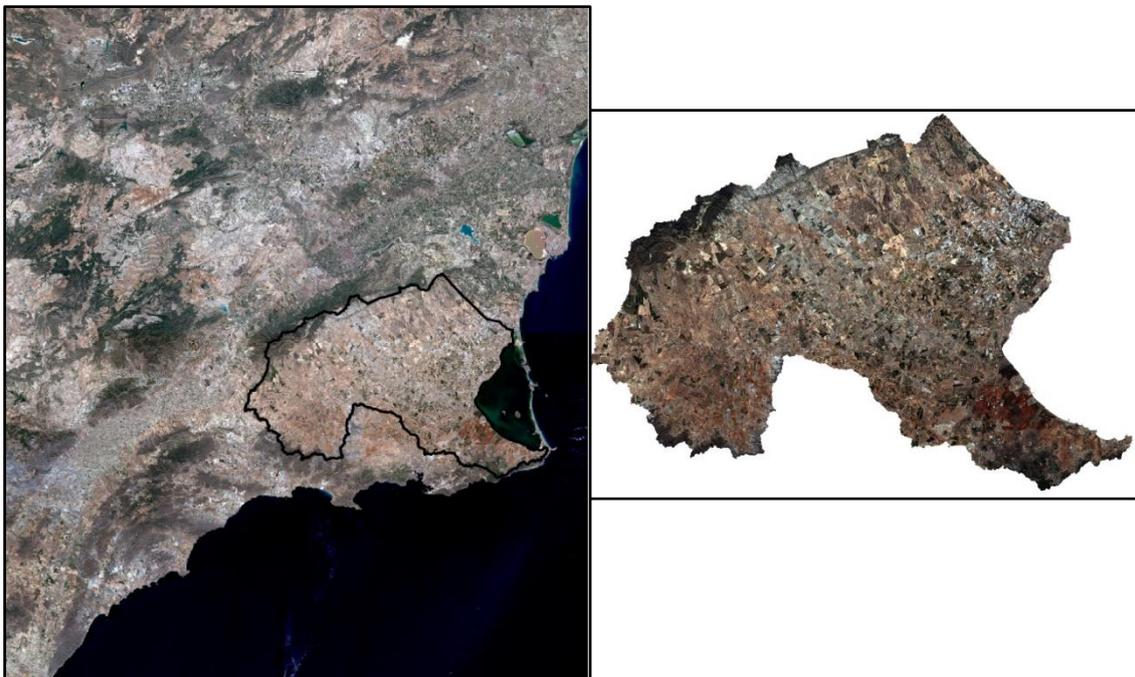


Imagen 20. Identificación y recorte de la cuenca vertiente al Mar Menor. Fuente propia.

Previo a la realización del recorte, existe la posibilidad de emplear un pequeño *Buffer* de 10m (1 píxel) sobre el *shapefile* de la cuenca vertiente al Mar Menor, si se tiene interés que todos los píxeles de borde queden incluidos en el proyecto evitando problemas de ajuste. Sin embargo, en este proyecto no se ha realizado este paso, puesto que las zonas de cultivo de regadío se encuentran alejadas del límite de extensión.

-Automatización: Como se ha descrito, el proceso de pretratamiento de las imágenes cuenta con cuatro operaciones, de las cuales, tres de ellas se realizan con el software ArcGIS. Estas cuatro operaciones se tienen que realizar sobre las 24 imágenes empleadas en el proyecto, lo que resulta, además del tiempo empleado en el procesamiento, un proceso repetitivo y tedioso. Para facilitar y agilizar el pretratamiento de las imágenes, se ha recurrido a automatizarlo mediante el uso de la herramienta *Model Builder*. Esta herramienta permite crear flujos de trabajo mediante un lenguaje de programación visual, logrando establecer las operaciones de geoprocésamiento requeridas en un diagrama que encadena las diferentes herramientas y procesos. El *Model Builder* diseñado para el procesamiento se muestra parcialmente en la Imagen 21.

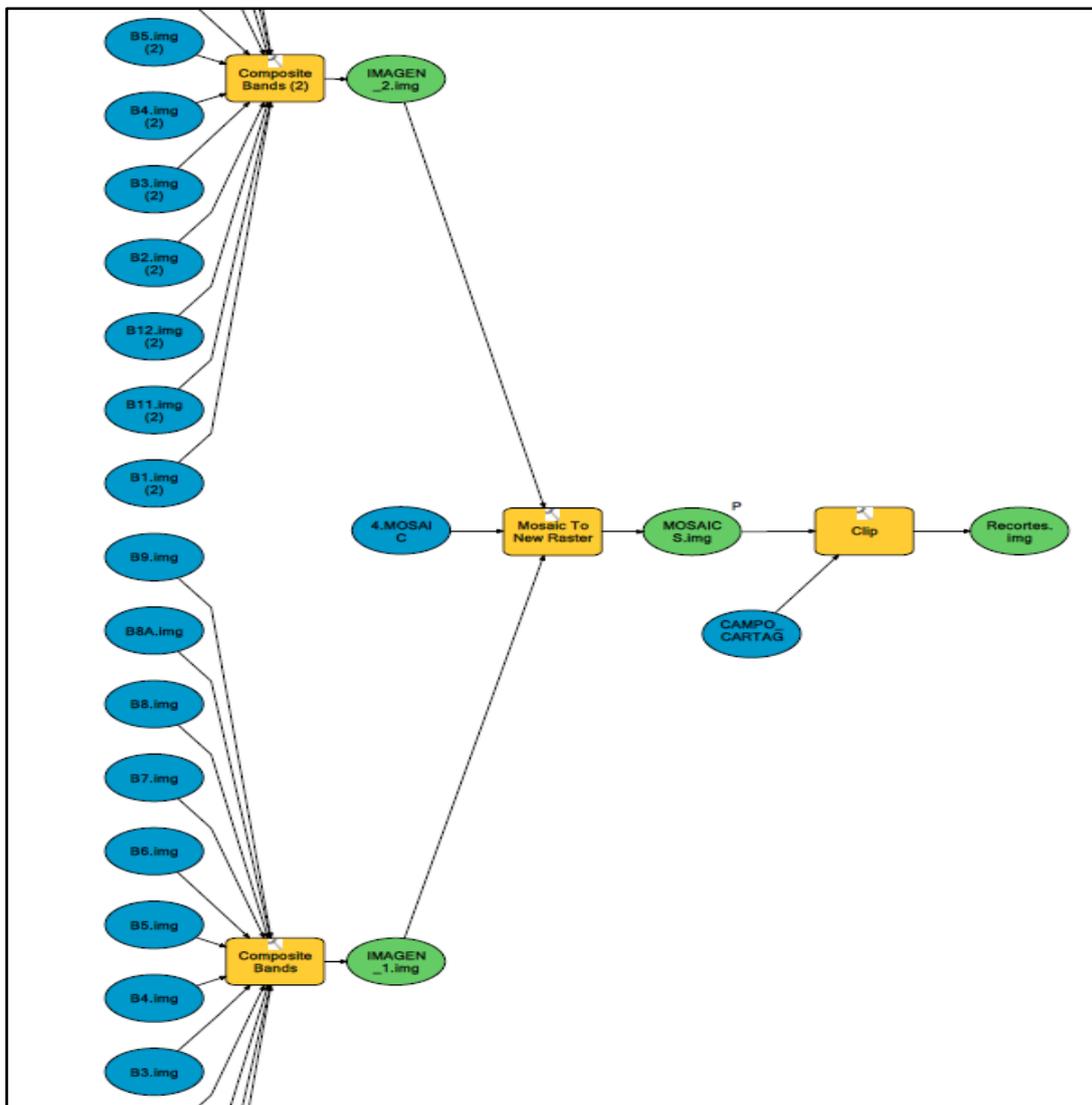


Imagen 21. Model Builder propuesto para la automatización del preprocesamiento. Elaboración propia.

6.1.4. Condiciones para realizar una clasificación supervisada:

La clasificación supervisada de una imagen se inicia con el establecimiento de las áreas de entrenamiento, de las que se conocen con gran exactitud a que clase pertenecen. Una vez las áreas han sido establecidas, cada píxel de la imagen se le asigna una categoría, basándose en los atributos de las áreas de entrenamiento. Por lo tanto, la clasificación supervisada fuerza la clasificación de la imagen de acuerdo a las coberturas definidas por el usuario. El hecho de que las imágenes se clasifiquen de acuerdo al interés del usuario, no garantiza que las clases muestren diferencias de reflectividad suficientes, lo que dificulta la diferenciación estadística de estas (Rees, 2005).

Por el contrario, la clasificación no supervisada dificulta que la clasificación se haga de acuerdo al interés del usuario, teniendo este que centrarse en la interpretación de los resultados. Por lo tanto, las clases creadas, corresponden únicamente a las diferencias estadísticas existentes entre ellas. (Chuvieco, 2000). También se puede decir que las clasificaciones no supervisadas pueden resultar ser un método exploratorio para la clasificación supervisada (Mather, 1989), ya que lo que buscan es determinar las clases espectrales presentes en la imagen.

De acuerdo a las anteriores afirmaciones, en este trabajo, se ha empleado de una manera exploratoria una clasificación no supervisada de la imagen, para determinar el número óptimo de clases espectrales presentes en ellas. Para ello, se ha empleado la herramienta *ISO_Cluster*. Se trata de un método de clasificación no supervisada, que se utiliza generalmente como método previo a las clasificaciones supervisadas. El *ISO_Cluster*, crea grupos de píxeles con similar respuesta espectral, mediante un método iterativo de migración del valor medio, basado en la distancia euclídea. Por lo tanto, la cantidad de clases que se obtienen son igual al número de grupos que han podido ser creados.

Mediante un proceso iterativo, se establecieron el número de clases en los que se quería que se clasificase la imagen, correspondiendo al usuario interpretar el resultado y establecer finalmente el número de clases óptimo para la clasificación supervisada. Así pues, se empezó el proceso estableciendo cuatro clases diferentes, iterando hasta alcanzar las quince clases. En este punto, se visualizó

que clasificar la imagen en cuatro clases, resultaría inapropiado para la finalidad del trabajo, puesto que las clases obtenidas no ofrecían una separación adecuada. Por el contrario, al emplear quince clases, se obtenía un resultado demasiado heterogéneo, creándose por ejemplo clases diferentes dentro de un mismo cultivo. Los mejores resultados se obtuvieron con el establecimiento de 9 clases, dónde las clases creadas por diferencias espectrales eran similares a las requeridas por el proyecto. La imagen 22 muestra una clasificación no supervisada de nueve clases, perteneciente al mes de octubre de 2017.

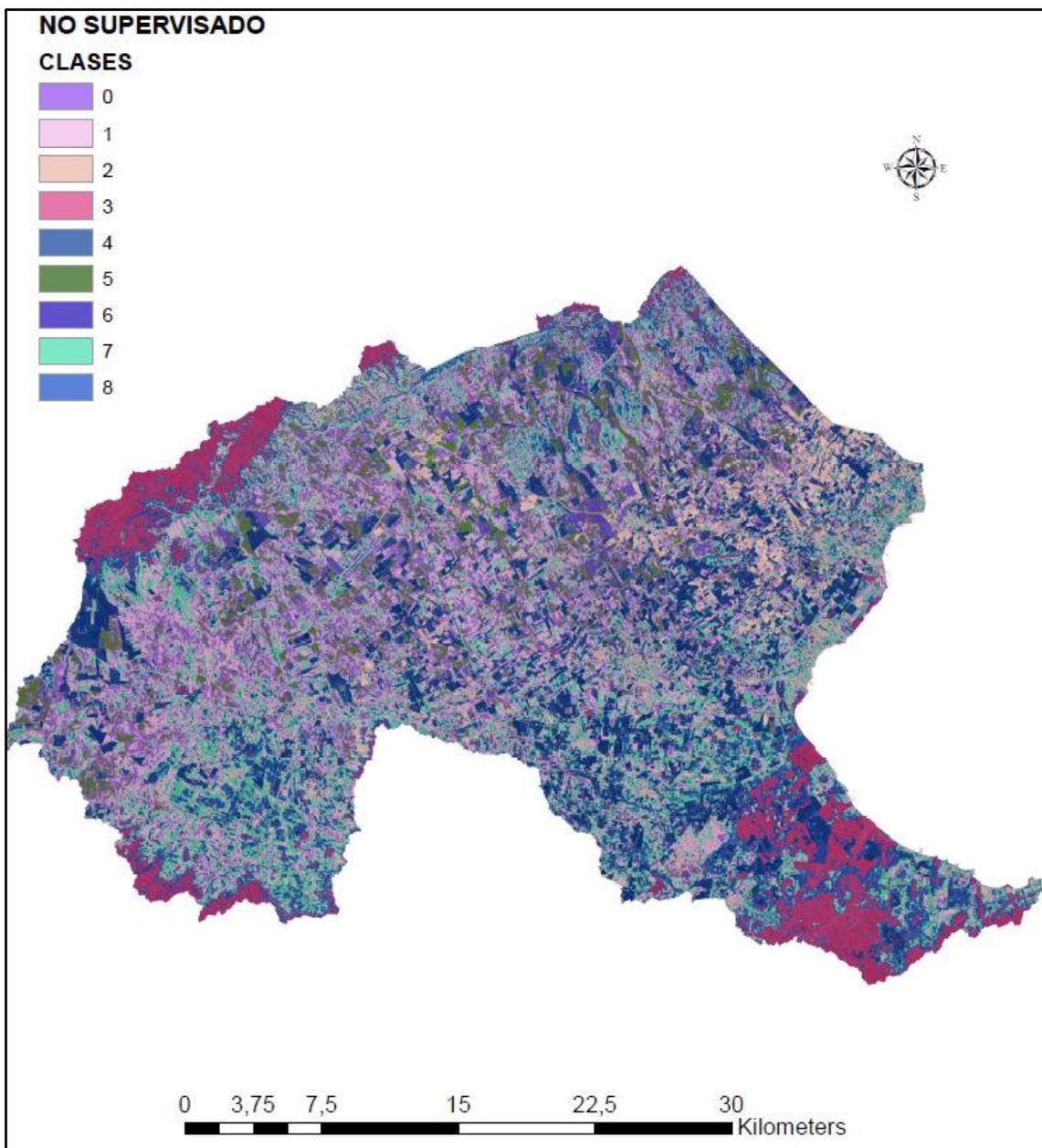


Imagen 22. Clasificación no supervisada de la región de estudio mediante la herramienta ISO_Cluster. Imagen perteneciente al mes de octubre de 2017. Elaboración propia.

Una vez se ha determinado el número óptimo de clases mediante clasificación no supervisada, se establecen las clases de interés de acuerdo a las necesidades del proyecto y las diferencias espectrales observadas entre las nueve clases creadas. De esta forma, se disminuye el efecto de forzar la clasificación de acuerdo a los deseos del usuario al realizar la clasificación supervisada. De acuerdo a las clases identificadas y los requerimientos del proyecto, se definen las siguientes clases:

1. **Industria:** Clase representada generalmente por naves industriales, ya sean de distribución, almacenamiento, producción o transformación. También se incluyen aquellas superficies listas para albergar naves industriales.
2. **Residencial:** Se trata de superficies artificiales modificadas por el ser humano. Dentro de esta clase se identifican superficies ocupadas por viviendas e infraestructuras viarias, portuarias y aeroportuarias.
3. **Invernadero:** En la clase invernadero se pretenden incluir aquellas superficies agrícolas cubiertas por invernaderos, en las que se realizan cultivos de regadío o se emplean para semilleros. También se incluyen en esta clase los cultivos de exterior que se realizan mediante acolchado, como es el caso del melón.
4. **Monte:** En la clase definida como Monte, se representan aquellas cubiertas ocupadas por cualquier cubierta vegetal de origen natural, que incluya monte bajo, medio o alto con su vegetación característica y las zonas de humedales, en la que la vegetación superior sea densa y esté compuesta por arbustos y carrizales.
5. **Agrio regadío:** En esta clase se incluyen cultivos anuales de cítricos y frutales de regadío, como mandarinos, naranjos y limoneros.
6. **Huerta:** Clase definida a partir de los cultivos rotativos intensivos de regadío que se dan el Campo de Cartagena. A esta clase pertenecen el brócoli, la lechuga, la alcachofa, tuberculosas, forrajeras... etc.

7. **Barbecho:** Pretende representar aquellas tierras de cultivo estacional que se encuentran aradas y sin cultivar o que se cultivarán próximamente.
8. **Agua:** Superficies cubiertas por este elemento. Balsas de riego, lagunas, embalses, depuradoras y marismas, en las que el agua es el elemento predominante y no la vegetación.
9. **Secano:** Clase creada para identificar principalmente cultivos permanentes de secano, como es el caso de los almendros. En esta clase también se incluyen zonas de reducida vegetación, situadas espectralmente entre el monte bajo y el barbecho.

6.1.5. Definición de las regiones de entrenamiento:

Una vez se han elegido las clases de interés, se definen las regiones de entrenamiento. Las regiones de entrenamiento son los polígonos definidos por el usuario que permiten posteriormente realizar la clasificación de la imagen. Por lo tanto, estas muestras tienen que ser elegidas cuidadosamente puesto que una elección incorrecta resultará en una mala clasificación. Entre los métodos más empleados para cerciorarse de una correcta elección se encuentran los estudios de campo y el empleo de fotogrametría de elevada resolución.

Además de una correcta elección, otro parámetro de elevada importancia es el tamaño y distribución de la muestra. En conjunto, estos parámetros son variables dependiendo de la heterogeneidad de la imagen, aunque se recomienda un tamaño de muestra de al menos 100 puntos y una distribución lo más homogénea posible a lo largo de la imagen, con la que poder reflejar las varianzas espectrales. Finalmente, un análisis estadístico puede ayudar a visualizar lo acertado de la selección y las diferencias entre las clases creadas (Sobrinho, J.A., Raissouni, N., Kerr, Y., Olivoso, et. Al. 2000).

Así pues, en este trabajo se han definido las regiones de entrenamiento con la creación de polígonos representativos de las nueve clases de acuerdo a las recomendaciones recogidas en la revisión bibliográfica. Se ha tratado que estos

polígonos se distribuyan de la manera más homogénea posible a lo largo de la imagen para detectar las diferentes respuestas espectrales de una misma clase (diferentes tipos de suelos, estado vegetativo del cultivo... etc.). Para facilitar la clasificación e intentar obtener el mejor resultado posible, se han definido por lo menos cien polígonos por clase, definiendo cada uno de ellos con el apoyo de imágenes aéreas de elevada resolución del PNOA, programas de información de los usos del suelo SIOSE y CORINE LAND COVER e información del uso declarado del suelo encontrado en catastro, todo ello complementado con observaciones puntuales de campo. La imagen 23 muestra una fase en el proceso de creación de las regiones de entrenamiento.

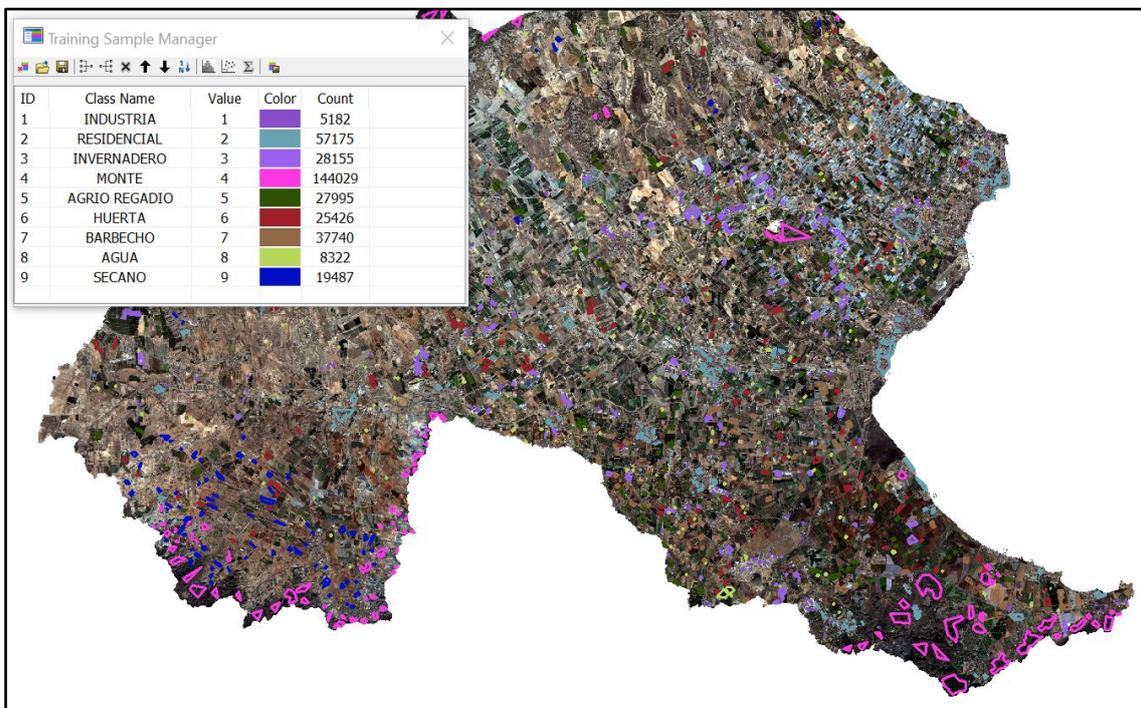
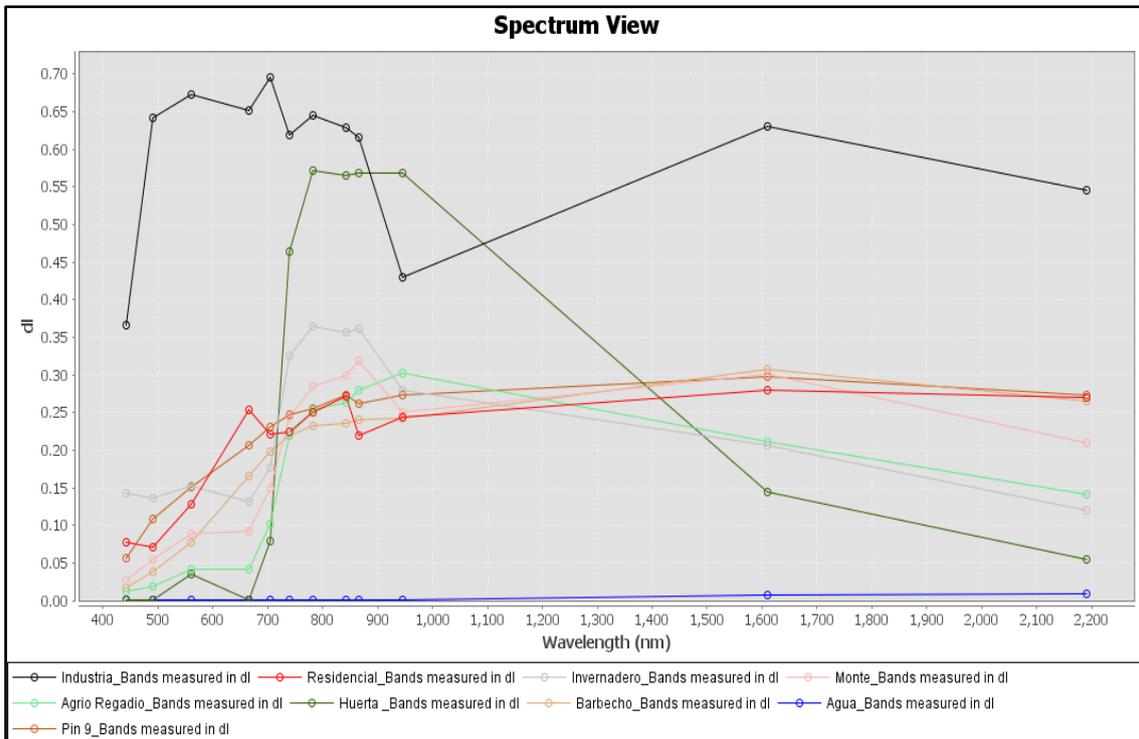


Imagen 23. Definición de las regiones de entrenamiento para la imagen de febrero de 2018. Elaboración propia.

La definición de las regiones de entrenamiento se realizó mediante la creación de *shapefiles* (*shp.*) que permiten posteriormente crear un archivo *ecd*. Este archivo recoge las estadísticas de las clases creadas, lo que posibilita clasificar el ráster posteriormente. Con la creación de las estadísticas, además de permitir la clasificación de la imagen, se logra identificar cuáles de las clases creadas pueden presentar problemas en la clasificación, dando lugar a errores por omisión o comisión. En la gráfica 4 se muestra la respuesta espectral de las

regiones de entrenamiento creadas para la imagen de febrero de 2018, logrando identificar visualmente las similitudes radiométricas entre las diferentes clases.



Gráfica 4. Respuesta espectral de las clases creadas. Elaboración propia.

Al analizar la Gráfica 4, se observa que la mayor similitud espectral se produce entre la clase *Barbecho* y *Secano*, por lo que es de esperar que la mayor confusión en la clasificación se dé entre estas dos clases. El resto de las clases muestran diferenciación entre ellas, destacando *Industria*, *Huerta* y *Agua*, de las que se espera al haber realizado este análisis previo, una óptima clasificación.

Finalmente, como la clasificación se realiza a lo largo de un año hidrológico sobre una zona en constante evolución, resulta imposible emplear las mismas regiones de entrenamiento para cada una de las imágenes, obligando a definir para cada mes unas nuevas regiones de entrenamiento, lo que deriva en un proceso repetitivo con elevados requerimientos de tiempo. En este punto, se barajó la posibilidad de obtener las firmas espectrales de las regiones de entrenamiento creadas para la primera imagen tratada, con el objetivo de emplearlas para automatizar la clasificación en las imágenes posteriores. Sin embargo, se

desistió en esta iniciativa puesto que cada mes del año presenta unas condiciones particulares (humedad del suelo, estado vegetativo de los cultivos, ángulo zenital), lo que puede conllevar que una misma clase no tenga la misma respuesta espectral en diferentes épocas del año y se reduzca la calidad de la clasificación realizada.

Sin embargo, de las nueve clases creadas, se identificó que seis de ellas eran menos sensibles a las variaciones temporales a lo largo de un año que el resto. Para estas clases, identificadas como *Industria, Residencial, Monte, Regadío, Agua y Secano*, en vez de crear las regiones de entrenamiento pertinentes para cada imagen, se emplearon las definidas inicialmente para el mes de octubre de 2017, previa comprobación en cada imagen que la superficie que representaban no mostrase cambio alguno.

6.1.6. Clasificación de la imagen:

El desarrollo de métodos para extraer información de imágenes satélite ha sido una de las mayores tareas que ha llevado a cabo en las últimas décadas la comunidad dedicada a la teledetección (Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., & Franklin, J. 2005). Así pues, resulta comprensible que, dependiendo del autor, se siga una determinada estrategia con la que clasificar la información que se presenta en la imagen. En términos de robustez y precisión por su capacidad de extraer información, destacan los métodos supervisados, siendo además los más empleados en la actualidad. Estos métodos funcionan a partir del establecimiento de conocimiento previo (definición de las clases de entrenamiento) y permiten realizar una asociación acertada a partir de las etiquetas creadas (Geiß, C., Pelizari, P. A., Blickensdörfer, L., & Taubenböck, H. 2019).

Sin embargo, debido al gran número de métodos de clasificación supervisada disponibles, resulta complicado decantarse por un método en concreto, del que se sepa con certeza que va a ofrecer los mejores resultados. (Fernández-Delgado, M., Cernadas, E., Barro, S., & Amorim, D. 2014).

Inicialmente, se puede suponer que los principales métodos supervisados son bastante preciosos y los resultados obtenidos serán aceptables (Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. 2017).

Entre los diferentes tipos de clasificadores, los Support Vector Machine o SVM son utilizados típicamente como un clasificador supervisado, que requiere de regiones de entrenamiento. La revisión bibliográfica realizada indica que los SVM no son especialmente sensibles a la extensión de la muestra de entrenamiento, habiendo ofrecido resultados exitosos aun disponiendo de regiones de entrenamiento de reducida extensión y calidad. Estos pertenecen a la familia de algoritmos de aprendizaje autónomo o *Machine Learning*, ampliamente empleados sobre archivos de elevado tamaño, el desarrollo de redes neuronales y sistemas de reconocimiento facial (Osuna, E., Freund, R., & Girosi, F. 1997, June). También se tratan de algoritmos de creciente popularidad en el tratamiento y clasificación de imágenes obtenidas por drones, aeroplanos y satélites (Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. 2011).

Estos clasificadores no son los más extendidos entre la comunidad científica dedicada a la teledetección y son menos conocidos que los algoritmos basados en árboles de decisión, sin embargo, en los últimos años se ha apreciado un aumento exponencial de las publicaciones destinadas a la clasificación de imágenes que han empleado un SVM. Por sus características, este método parece el ideal para su empleo en el campo de la teledetección, puesto que no siempre se dispone de una amplia información con la que caracterizar las regiones de entrenamiento. Los SVM están llamados a convertirse en una herramienta de referencia en el campo de la teledetección, especialmente por su habilidad de realizar clasificaciones acertadas con un reducido número de regiones de entrenamiento, obteniendo habitualmente mejores resultados que con los clasificadores utilizados tradicionalmente, minimizando el riesgo de confusión entre clases. (Mantero, P., Moser, G., & Serpico, S. B. 2005).

Los SVM se tratan de una técnica supervisada no paramétrica de aprendizaje autónomo a través de las estadísticas formulado originalmente en 1979. Con las estadísticas obtenidas de las regiones definidas por el usuario, el algoritmo aumenta artificialmente el número de clases de entrenamiento, tratando de

definir un hiperplano con el que separar los datos de entrada y discretizarlos dentro del número de clases predefinido previamente. El algoritmo trata además de establecer el hiperplano de separación óptimo, este se define como el contorno óptimo que define una clase y que minimiza el riesgo de que ocurra una clasificación incorrecta. De esta manera, mediante aprendizaje autónomo, el algoritmo aumenta la información con la que realizar la clasificación, clasificando con mayor garantía la imagen que con únicamente los datos de entrada definidos por el usuario, tratando además de establecer la máxima diferencia entre clases tal y como se observa en la Imagen 24. (Geiß C., et Al. 2019).

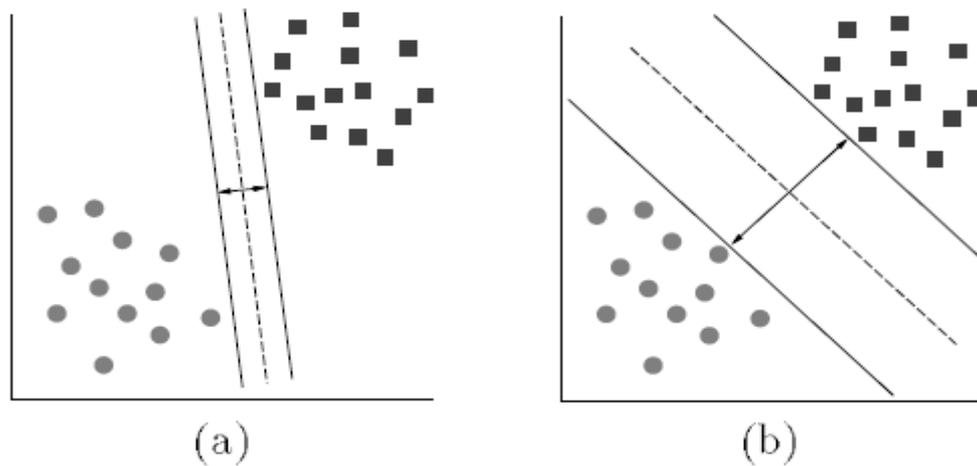


Imagen 24. Diferenciación de clases mediante SVM. Fuente: Osuna Edgar, et Al. 1997.

Como se puede observar en la Imagen 24, con el empleo de un método de clasificación cualquiera, las dos clases mostradas en el caso (a) se encuentran correctamente clasificadas al igual que en el caso (b) donde se emplea un SVM. Sin embargo, la diferencia entre ambos es patente, observando como el SVM establece el hiperplano de manera que se establezca la máxima distancia entre clases, lo que dificulta que se produzcan clasificaciones incorrectas.

A la vista de la revisión bibliográfica realizada y las ventajas que aportan los SVM en cuanto a requerimientos de regiones de entrenamiento y resultados de clasificación, en este trabajo se ha empleado para realizar la asignación de clases el algoritmo llamado *Train Support Vector Machine*. Los parámetros que

se han aplicado sobre dicho algoritmo para obtener los resultados que posteriormente se exponen en este proyecto, se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Parámetros escogidos en la aplicación del Train Support Vector Machine. Elaboración propia.

Input Raster:	Imagen recortada con las 12 bandas espectrales
Input training file	Archivo <i>shapefile</i> elaborado en la fase de creación de las regiones de entrenamiento
Output Classifier Definition File	Directorio de almacenamiento y nombre que se quiera dotar al archivo
Additional Input Raster	-
Max. Number of samples per class	Default (500)

Con el asignador mencionado y los parámetros definidos en la Tabla 17, se obtiene un archivo con la extensión .ecd. Este archivo contiene la información definida por el algoritmo para realización la clasificación de la imagen. Se ha obtenido un archivo .ecd para cada una de las imágenes mensuales, a partir de sus propias regiones de entrenamiento. Finalmente, el último paso para obtener la imagen clasificada es introducir el archivo ecd. creado en la herramienta de clasificación.

6.1.7. Mejora de la clasificación:

Uno de los principales inconvenientes que presentan los clasificadores, es que estos únicamente se basan para realizar la clasificación en las diferencias espectrales que muestra cada clase definida en las regiones de entrenamiento, sin tener presente la vecindad entre píxeles. De esta manera, se puede dar el caso de que, dentro de un grupo de píxeles clasificados en una categoría dada, se encuentren píxeles asignados a otras clases. Este fenómeno es conocido como “sal y pimienta” y existen diferentes metodologías para solucionar este problema, como es la aplicación de filtros o el empleo de imágenes segmentadas. (Conde, M. C., Perelman, S. B., & Cerezo, A. 2009).

Con el objetivo de mitigar o eliminar dicho efecto, en este proyecto se ha aplicado un filtro mayoritario (*majority filter*) sobre la imagen. El filtrado de la imagen se

rige mediante un proceso matemático denominado como convolución espacial. Este algoritmo analiza la imagen de entrada píxel por píxel dando como resultado un archivo de salida en el que el valor de cada píxel depende de los valores de los píxeles vecinos de la imagen de entrada. Así pues, al coleccionar la información referente a los píxeles vecinos sobre un píxel central, la convolución espacial es capaz de calcular la frecuencia espacial en esa área y, por lo tanto, ofrecer un resultado de acuerdo a la frecuencia espacial existente. El grupo de píxeles empleados para calcular el valor del píxel de salida se denomina como núcleo o *kernel*, siendo este una matriz móvil usualmente cuadrada. Cuanto mayor es el núcleo, mayor grado de libertad adquiere el filtrado de espacial. Finalmente, adicionalmente al núcleo de la matriz, existen una serie de constantes establecidas por el usuario, lo que permite modificar los resultados del archivo de salida conforme a sus necesidades. (Aldalur, B., & Santamaría, M. 2002).

Conociendo los conceptos teóricos del filtrado de imagen y la posibilidad del usuario de influir en el resultado del proceso, con la aplicación del *majority filter* se han escogido las siguientes variables (ESRI):

Spatial analyst → Generalization → Majority filter

- **Umbral de reemplazo** (*replacement threshold*). Se trata del establecimiento del número de píxeles vecinos coincidentes con el píxel analizado para que se produzca el cambio. En este apartado se ha establecido la opción *half*. frente a la opción *majority*. Para que no se produzca el cambio de valor el píxel central, dos de cuatro celdas contiguas tienen que tener el mismo valor. La opción *half* crea una imagen más suavizada permitiendo un filtrado más extensivo.
- **Número de vecinos**. La definición del número de vecinos concierne a la definición del tamaño del *kernel*. De las opciones que se ofrecen (*four* y *eight*), la empleada en este proyecto es *four*. Por lo tanto, para el filtrado, el algoritmo tendrá en consideración la posición de las cuatro celdas contiguas situadas ortogonalmente al píxel central.

6.1.8. Construcción de la matriz de confusión:

Con la realización de la clasificación, es necesario emplear un método con el que evaluar la calidad de la misma, evitando los juicios de valor y estableciendo un coeficiente de precisión con base estadística. La matriz de confusión o tabla de contingencias, se trata de una tabla de doble entrada, en la que se enfrentan los valores obtenidos por la clasificación y la verdad terreno. En la diagonal de dicha matriz se muestran los píxeles que concuerdan con la clasificación asignada y la verdad terreno, estando aquellos que se confunden con otras clases situados en otras posiciones de la matriz. De esta manera, la matriz de confusión es capaz de mostrar los errores cometidos en la clasificación, ya sean por omisión o comisión. (Borràs, J. et Al. 2017).

Tal y como se ha expuesto en la revisión bibliográfica realizada, en el Cap. 3, en el apartado 3.4, para la construcción de la matriz de confusión, en primer lugar, se requiere establecer una fase de muestreo, en la que se compare la verdad terreno con los resultados obtenidos por la clasificación de la imagen. Para realizar esta comparación con garantías, previamente se ha de definir claramente que superficies componen cada clase, para minimizar la subjetividad del usuario. En el proyecto, se han discriminado las superficies en las nueve clases de clasificación mostradas en el presente capítulo, en el apartado 6.1.4.

Para crear el archivo empleado para la realización del muestreo se ha utilizado la herramienta *Create accuracy assessment points*. Mediante los parámetros de entrada concernientes a la distribución y el tamaño de la clase, esta herramienta crea un shapefile con el que el usuario puede comparar visualmente y asignar si la verdad terreno corresponde con la clase clasificada. De las opciones que se ofrecen para la distribución de la muestra, se ha empleado la opción *Equalized Stratified Random*, que crea los puntos y los distribuye aleatoriamente en cada clase, teniendo cada clase el mismo número de puntos independientemente de su tamaño. Analíticamente, este hecho puede ofrecer un resultado más estricto de la clasificación, puesto que las clases de menor superficie pueden verse proporcionalmente más supervisadas que las de mayor extensión. El tamaño de muestra establecido es de 500, siendo este el tamaño mínimo de muestra recomendable.

Con los anteriores parámetros, la herramienta crea un archivo shapefile con 500 puntos que representan la muestra, empleada para comparar la verdad terreno con la clasificación asignada. Para realizar esta comprobación y determinar los casos en los que hay concordancia y en los que no, se ha empleado una inspección visual sobre la misma imagen satélite en aquellos casos en los que no existían dudas y para aquellos en los que no se lograba una fácil discriminación visual se han empleado imágenes de alta resolución y planes de usos del suelo. Con la metodología expuesta, se han comprobado y asignado los valores reales y de clasificación de los 500 puntos que componen la muestra, para las doce imágenes que componen el presente trabajo. La Tabla 16 expone el diseño tipo empleado para la discriminación de las superficies en la fase de muestreo.

Tabla 16. Fragmento de tabla tipo empleada en la fase de muestreo. Elaboración propia.

FID	SHAPE	CLASSIFIED	GROUND TRUTH
0	Point	3	4
1	Point	1	4
2	Point	4	4
3	Point	1	4

Como se observa en la Tabla 16, las columnas de mayor relevancia son las pertenecientes a los campos *CLASSIFIED* y *GROUND TRUTH*. El algoritmo crea los puntos de muestreo y asigna en el campo *CLASSIFIED* en que clase se ha clasificado. Seguidamente, el usuario mediante el empleo de imágenes de elevada resolución comprueba la verdad terreno e identificándola, la clasifica manualmente en la columna *GROUND TRUTH*. Así pues, para el caso particular de este proyecto, ambas columnas pueden adquirir nueve valores diferentes (correspondientes a las nueve clases establecidas), mostrando valores idénticos en ambas cuando hay coincidencia y mostrando valores distintos cuando hay divergencias.

Una vez se han rellenado los 500 registros de las tablas, estas se pueden emplear como dato de entrada en la matriz de confusión. Para ello se emplea la herramienta *Compute Confusion Matrix*. Con los shapefiles de entrada, el programa calcula automáticamente las matrices de confusión y el estadístico Kappa. Los datos de salida, se ofrecen en forma de geodatabase y extensión gdb. Mediante el procedimiento detallado, se han obtenido doce matrices de confusión, con sus estadísticos correspondientes que se muestran resumidamente en el Capítulo 7 y completamente en el anexo, con las que poder evaluar objetivamente la calidad de la clasificación realizada para cada imagen.

6.1.9. Detección de cambios:

Mediante el análisis de los cambios producidos sobre las cubiertas, se puede obtener información fundamental para la gestión del territorio, ya sea en materia ambiental (evolución de la deforestación, incendios forestales... etc.) o de planificación territorial. Tal y como recogen Jiménez-Moreno, M.J. et al. (2011), existen principalmente dos métodos con los que detectar los cambios mostrados por las imágenes satélite. El primero la detección del cambio se logra a través de la clasificación de la imagen, realizando una comparación post-clasificación. El segundo método consiste en el análisis simultáneo imágenes multitemporales. Ambos métodos presentan sus ventajas y desventajas, pero el primer método es el más común y extendido.

Así pues, para lograr detectar los cambios entre imágenes, en este proyecto se ha decidido analizar el resultado obtenido del proceso de clasificación de las imágenes. Debido a las características de la región de estudio, en la que se practican cultivos rotativos intensivos, una misma parcela agrícola se puede cultivar, recolectar y labrar diversas veces a lo largo del año. Este proceso es detectable mediante teledetección, pues las zonas cultivadas muestran una respuesta espectral distinta a aquellas que se encuentren labradas y por lo tanto se habrán clasificado consecuentemente.

Basándose en la clasificación realizada a partir de la reflectividad de las cubiertas de las doce imágenes y el posterior proceso de mejora de la clasificación basado en la posición relativa de los píxeles, en este apartado se pretende establecer el

método con el que observar e identificar aquellas cubiertas que presentan cambios a lo largo del espacio temporal que abarca el estudio.

Previamente a establecer la metodología empleada para la detección de los cambios, se realizaron las siguientes hipótesis a partir del espacio temporal evaluado entre las imágenes (1 mes) y las características de las clases creadas, estableciendo los siguientes principios:

- La principal variación debe darse entre las clases de huerta y barbecho, puesto que previo al proceso de siembra se labra el campo.
- La clase representada como invernadero, debe mantenerse constante a lo largo del año, aunque puede aumentar a partir del mes de febrero debido a la introducción de cultivos de acolchado.
- Las clases secano y barbecho variarán entre ellas dependiendo del volumen de precipitación mensual, puesto que con una mayor precipitación las cubiertas que se encuentran sin labrar serán más fáciles de identificar que las que sí que lo están, ya que estas contarán con vegetación.
- El resto de clases, sobre todo las referentes a industria y residencial, serán poco susceptibles al cambio, dado que el espacio temporal evaluado es muy reducido para que se produzcan grandes cambios. En caso de detectar grandes variaciones mensuales, se supondrá que los cambios son producidos por una clasificación imprecisa.

Una vez los píxeles de las imágenes han sido clasificados en las diferentes clases definidas, estos pierden su valor de reflectividad inicial y se les dota del valor representativo de la clase. Al existir nueve clases, los valores que pueden adoptar los píxeles una vez clasificados varían entre [0,8], adoptando como valor 0 los píxeles clasificados como Industria, 1 los clasificados como Residencial y así paulatinamente de acuerdo al orden mostrado en el apartado 6.4. del

Capítulo 6, hasta alcanzar el valor máximo de 8, que les corresponde a los píxeles clasificados como Secano.

Es de esperar, que, contando con al menos dos imágenes consecutivas clasificadas correctamente en el espacio temporal, el territorio que experimenta cambio se clasifique de una manera diferente cambiando de clase y por lo tanto de valor numérico asignado, permaneciendo sin cambio aquellos puntos en los que la clase asignada permanezca impermutable.

Con el anterior principio, se realiza la resta entre dos rásters de diferente fecha clasificados en los que se quiere determinar los cambios que han ocurrido en el territorio. Los valores que se obtienen en esta operación pueden variar $[-8,8]$ al existir 9 valores diferentes de entrada. En aquellos lugares en los que no exista variación del uso del suelo, los valores entre los rásters comparados se mantienen iguales y, por lo tanto, los píxeles que no han sido clasificados de manera diferente adquieren el valor 0.

Para identificar el cambio del ráster obtenido al realizar la resta, se extraen todos aquellos valores distintos de 0, obteniendo un ráster cuyos píxeles varían entre $[-8,0) \cup (0,8]$, es decir, todos los píxeles que han sufrido una variación de clase. Sin embargo, aunque se ha determinado en que coberturas se ha realizado un cambio de clasificación, no se sabe a qué superficie ha cambiado. Para solucionar este inconveniente, se cambian los valores de la ráster extracción por aquellos resultantes de la imagen más reciente comparada. De esta forma, el ráster resultante, muestra el tipo de cambio que ha sufrido la superficie. La Imagen 25 muestra la detección del cambio en la zona sur del Mar Menor.

Finalmente, como la detección del cambio se ha realizado sobre imágenes clasificadas con sus correspondientes índices de fiabilidad, la fiabilidad de la detección del cambio se puede establecer como el producto de la bondad de clasificación de las dos imágenes implicadas.

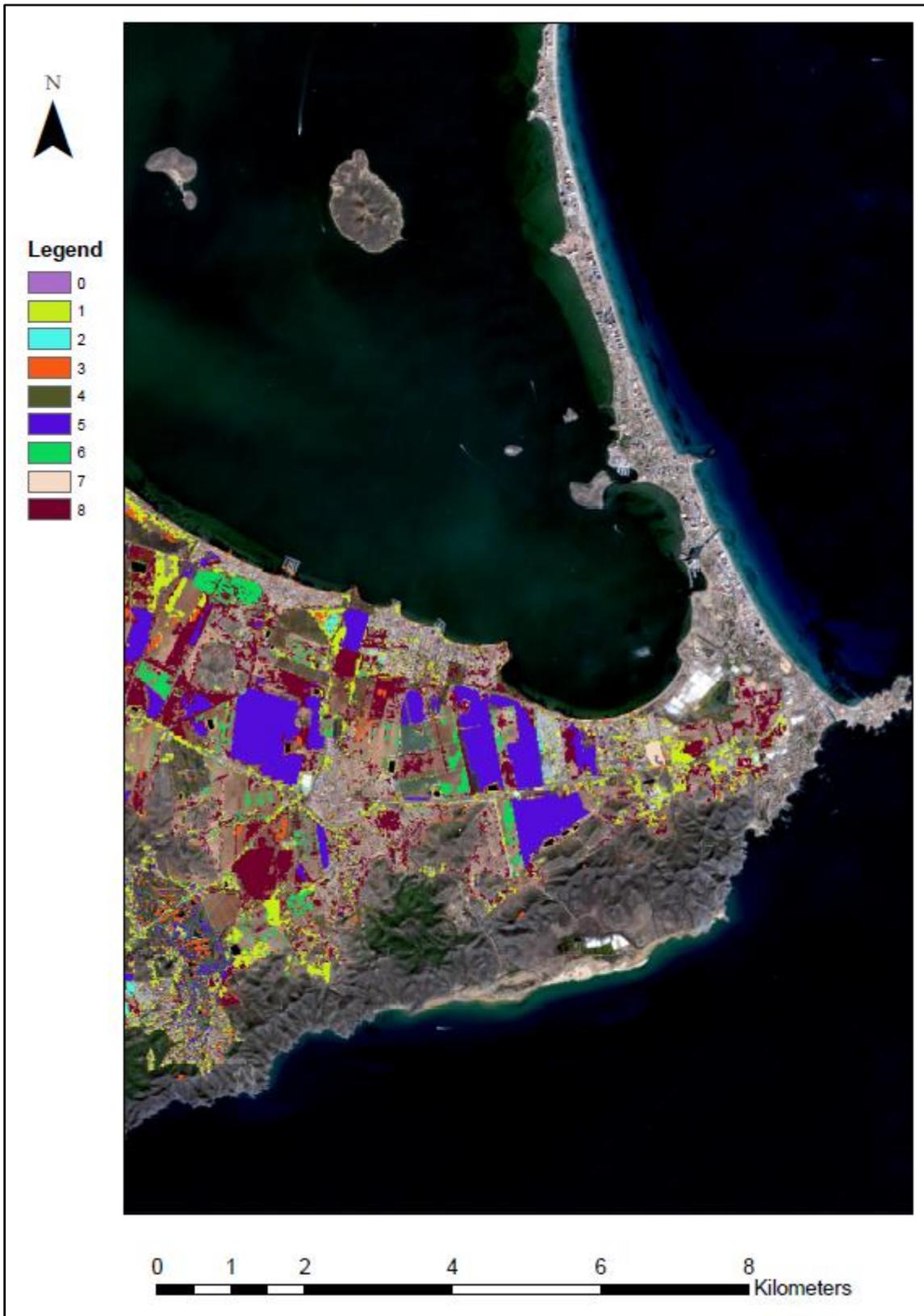


Imagen 25. Detección del cambio en el entorno de Cabo de Palos. Cambios detectados para el periodo de octubre a noviembre de 2017, dónde se observa el inicio del cultivo de hortalizas. Elaboración propia.

6.2. ELABORACIÓN DE UN MODELO DE TÉMEZ MEDIANTE EL EMPLEO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La teledetección se muestra como una herramienta muy potente con la que poder obtener información relativa de los usos del suelo de acuerdo a las necesidades del modelo hidrológico. En este apartado, se explica la metodología empleada para el desarrollo del modelo hidrológico, definiéndose en primer lugar la adopción de los valores de entrada y la regionalización de la zona de estudio. Seguidamente, se muestra la conversión de las ecuaciones del modelo de Témez para su integración en un Sistema de Información Geográfica y finalmente se contempla el uso de una herramienta con el que intentar lograr su automatización. Con todo ello, se pretende construir un modelo hidrológico en el que los resultados sean matemáticamente correctos y permitan evaluar la región de estudio, caracterizando principalmente la infiltración producida en zonas de cultivos agrícolas, para que en estudios posteriores se pueda determinar el tránsito de nitratos hacia el flujo subsuperficial.

6.2.1. Confección de los mapas de variables:

La adopción de los valores de entrada del modelo y su implementación sobre los rásters de entrada, suponen para el usuario una de las fases críticas del proyecto, puesto que la calidad de estos influirá determinadamente en los resultados obtenidos. Como se ha detallado en el Capítulo 2.3, el modelo de Témez requiere de unos valores de entrada, que se pueden clasificar entre los valores relativos a los parámetros meteorológicos (evapotranspiración de referencia y precipitación) y los parámetros característicos de la zona de estudio (infiltración máxima, almacenamiento del suelo y coeficiente de rescisión del acuífero). La metodología empleada para la regionalización de la zona de estudio es la misma que la aplicada en el Libro Blanco del Agua para la evaluación de los recursos hídricos en España, Monreal, T. E., et. Al (1999).

El empleo de la presente metodología también puede encontrarse en numerosos estudios más actuales, como es el caso de: *SIMPA, a GRASS based tool for hydrological studies*. Álvarez, J., et. Al (2005); *Implementación del modelo*

hidrológico de Témez para la evaluación de recursos hídricos con GRASS GIS: fase superficial y subterránea. Potenciano de las Heras, Á., & Villaverde Valero, J. J. (2009); *Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.* Junta de Andalucía (2009). *Aplicación del modelo de Témez a la determinación de la aportación superficial y subterránea del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada para su implementación en un modelo de uso conjunto.* Murillo, J. M. y Navarro, J. A., (2011); y *Modelización distribuida del impacto del cambio climático en componentes del ciclo hidrológico a escala mensual.* Olmos Giménez, P. (2012), entre otros.

Así pues, la metodología empleada, se encuentra ampliamente avalada por estudios realizados por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y demás autores, lo que confiere validez a los valores de entrada escogidos en el modelo que se plantea.

6.2.1.1. Variables climáticas:

En este apartado se muestra la metodología empleada para la determinación de los valores de precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETP) sobre la zona de estudio. El paso temporal del modelo hidrológico empleado se ha establecido como mensual, con un periodo de simulación de veinte años, periodo suficientemente elevado como para haber obtenido un estado estacionario.

De acuerdo a las características particulares del modelo planteado, se requieren de las series de precipitación y evapotranspiración con un paso temporal mensual. La fuente de dónde se obtiene la información, la distribución de las estaciones y las características de las series empleadas se encuentran en el Capítulo 5.2, dedicado a los materiales.

Con la obtención de las series de observación de los últimos veinte años de las estaciones ubicadas en la zona de estudio o alrededores, se procede en primer lugar a realizar un tratamiento sobre los valores. Los datos directamente descargados son agrupados en un único libro Excel, a partir del cual se calculan los promedios mensuales para los últimos veinte años de cada estación tanto de precipitación como de evapotranspiración. Una vez se ha realizado el promedio de los valores y con la ubicación de cada estación definida sobre el territorio, se

crea una tabla que seguidamente es abierta mediante el software ArcMap. De esta forma, se puede visualizar la ubicación de cada estación en la región de estudio. Las ubicaciones mostradas en ArcMap, contienen en la tabla de atributos la información correspondiente a los valores mensuales promedios calculados anteriormente. La Imagen 26, muestra la distribución espacial de las estaciones realizada mediante Sistemas de Información Geográfica

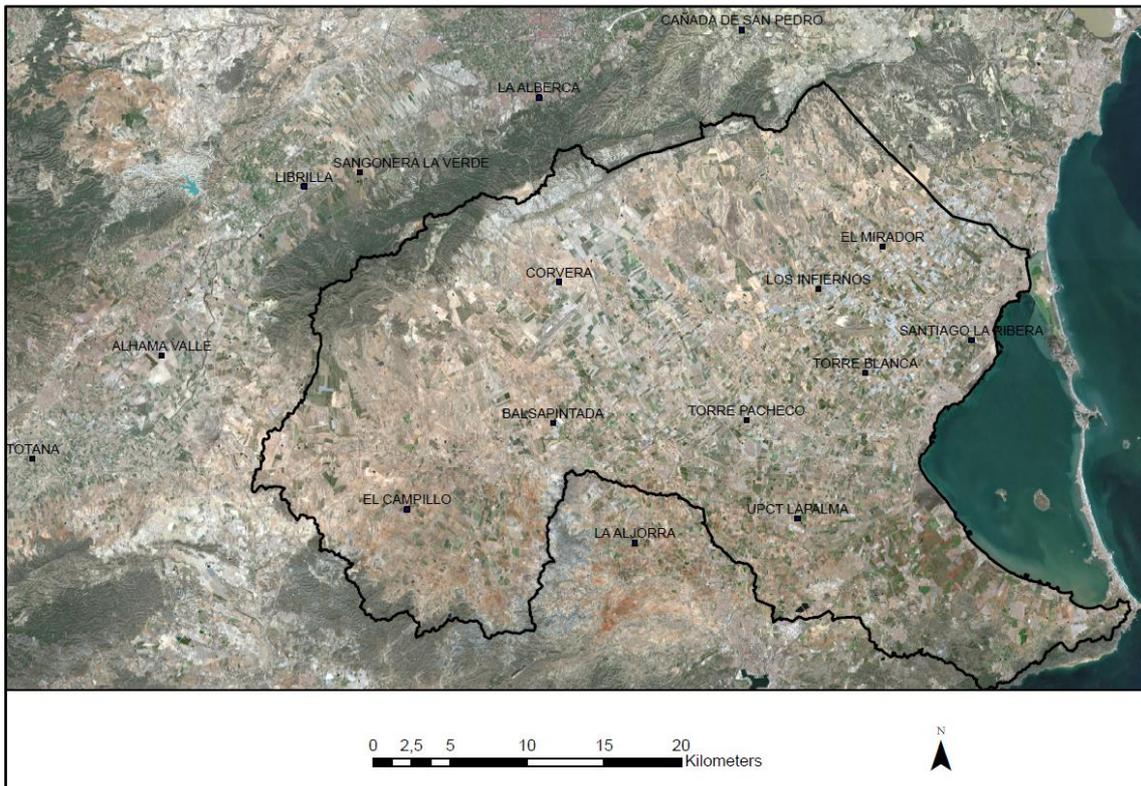
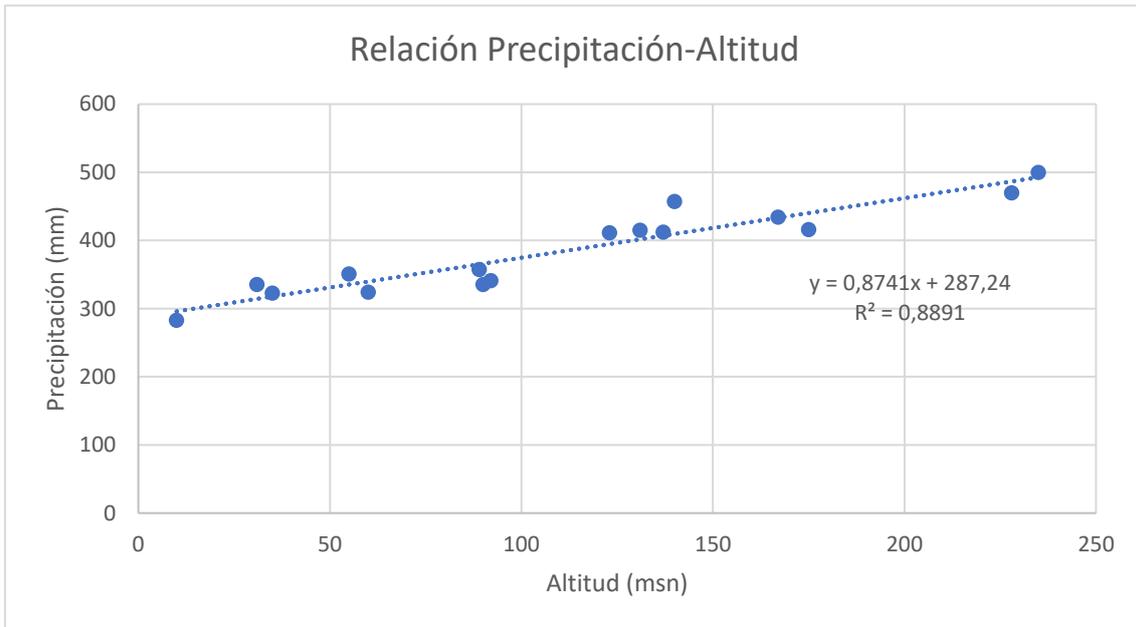


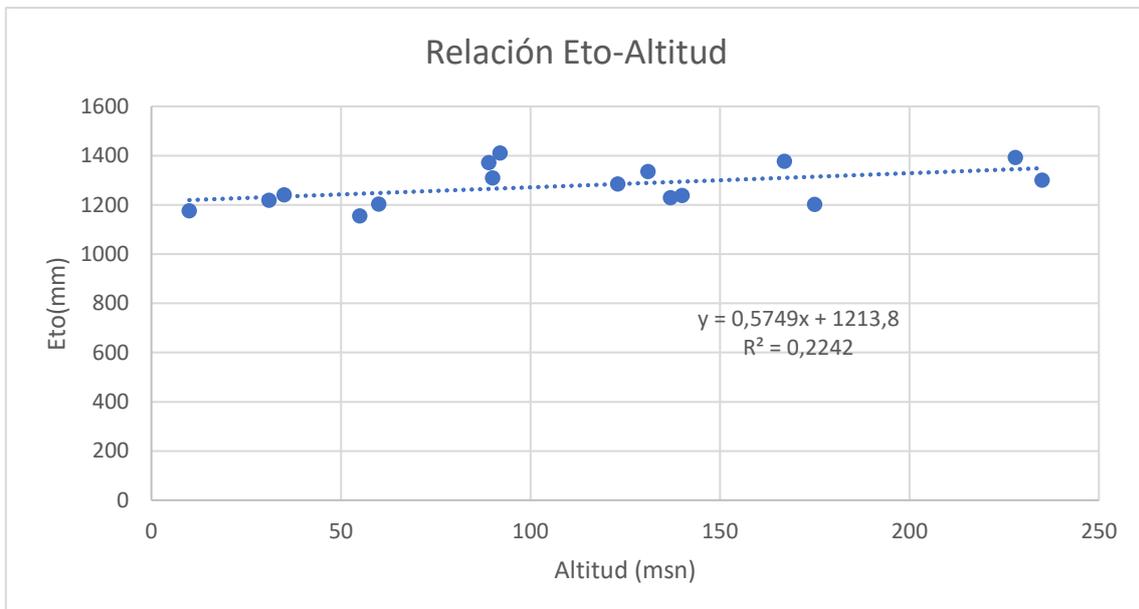
Imagen 26. Distribución de las estaciones de en la región de estudio. Elaboración propia.

Seguidamente, conociéndose la ubicación y la distancia entre estaciones se realiza una interpolación directa entre los valores de las estaciones, dotando de esta forma de un valor de precipitación y de evapotranspiración a cada píxel del ráster que compone la región de estudio. Este método presenta un problema, y es que los valores meteorológicos distan de variar de una estación a otra proporcionalmente, sino que los factores topográficos influyen notablemente en los valores de precipitación y temperatura, aumentando teóricamente las precipitaciones y disminuyendo la temperatura (y por lo tanto la evapotranspiración) conforme se aumenta la altitud. Para justificar la

metodología empleada, se han evaluado los datos de las estaciones, relacionándolos con la altitud de las mismas mediante un análisis de regresión. Las relaciones obtenidas se muestran en las Gráficas 5 y 6.



Gráfica 5. Relación de la altitud de las estaciones con el promedio anual promedio de los últimos 20 años. Elaboración propia.



Gráfica 6. Relación de la altitud de las estaciones con la evapotranspiración anual promedio de los últimos 20 años. Elaboración propia.

Al analizar las anteriores gráficas, se puede observar cómo se establece una muy buena relación mediante un ajuste regresivo lineal ($y=0,8741x + 287,24$) entre la precipitación y la altitud con un $r^2=0,89$. A primera vista, la relación establecida predice el aumento de precipitación con el aumento de la altitud, sin embargo, si se quisiera aplicar esta ecuación al total del aérea de estudio lo que incluye la cota más alta (pico de la Sierra de Carrascoy 1065msn), al sustituir en la ecuación, se obtiene que la precipitación estimada para ese punto es de 1218mm anuales. Es decir, en una zona en la que difícilmente se superan los 600mm anuales, el valor estimado lo doblaría. Esto se debe a que el tamaño de la muestra (16 estaciones) y el rango de altitud [10, 235] no es suficientemente representativo para la totalidad del territorio. Por su parte, la relación entre la evapotranspiración y la altitud parece no tener relación alguna $r^2=0,22$.

Así pues, la interpolación directa se ha establecido como método porque no se dispone de acceso a una red de estaciones meteorológicas lo suficientemente extensa y distribuida a diferentes rangos de altitud con las que poder establecer una relación concreta válida para la extensión total del territorio entre precipitación/evapotranspiración y altitud. Sin embargo, desde la realización de este proyecto, se recomienda utilizar una ecuación que relacione las anteriores variables con la elevación del territorio, si la red de estaciones cumple con los anteriores requisitos.

Finalmente, mediante interpolación directa y los valores promedios mensuales de los últimos veinte años (1997-2017), se han elaborado veinticuatro rásters que representan los valores de precipitación y evapotranspiración de la zona de estudio, con una resolución espacial de diez metros. La Imagen 27 muestra los valores de precipitación adoptados para el mes de octubre, a modo de representación del resultado obtenido.

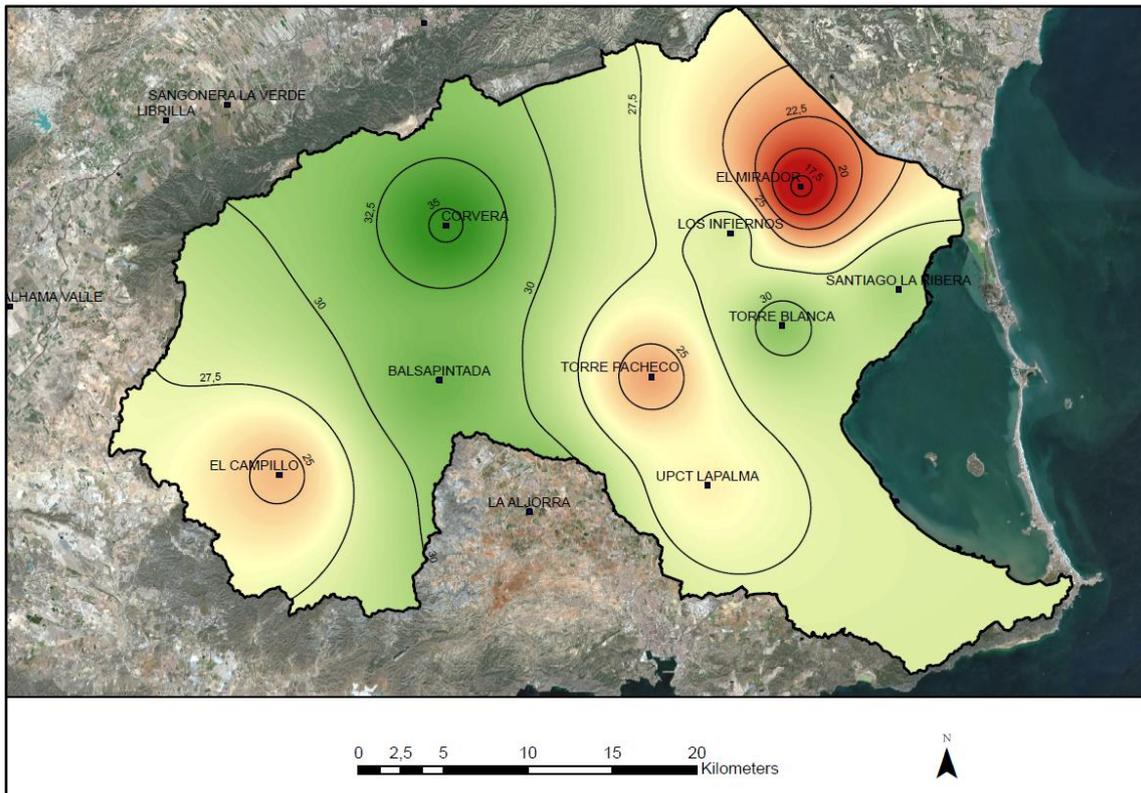


Imagen 27. Representación de los valores de precipitación asignados para el mes de octubre a partir de las estaciones dispuestas en y alrededor de la zona de estudio. Isohietas con resolución 2,5mm. Elaboración propia.

6.2.1.2. Regionalización geológica:

Este apartado hace referencia al método empleado para la asignación de valores de infiltración máxima (I_{max}) dependientes a las características geológicas de la región. Para la realización de este apartado se han empleado los valores de infiltración máxima mostrados en la Tabla 1, situada en el Capítulo 2.3.2, extraídos del Libro Blanco del Agua. En dicha Tabla, se relacionan los diferentes materiales geológicos más representativos del territorio español y se relacionan con diferentes valores de infiltración.

Para la caracterización geológica de la región de estudio, se dispone de una *shapefile* entregado amablemente por D. Manuel Alcaraz Aparicio y realizado por D. Emilio Trigueros Tornero, denominado como **Geomicarm** en el que se caracteriza la litología de la Región de Murcia. Para obtener la información primeramente se ha recortado dicho archivo, mediante la función Clip. El resultado obtenido se muestra en la Imagen 28.

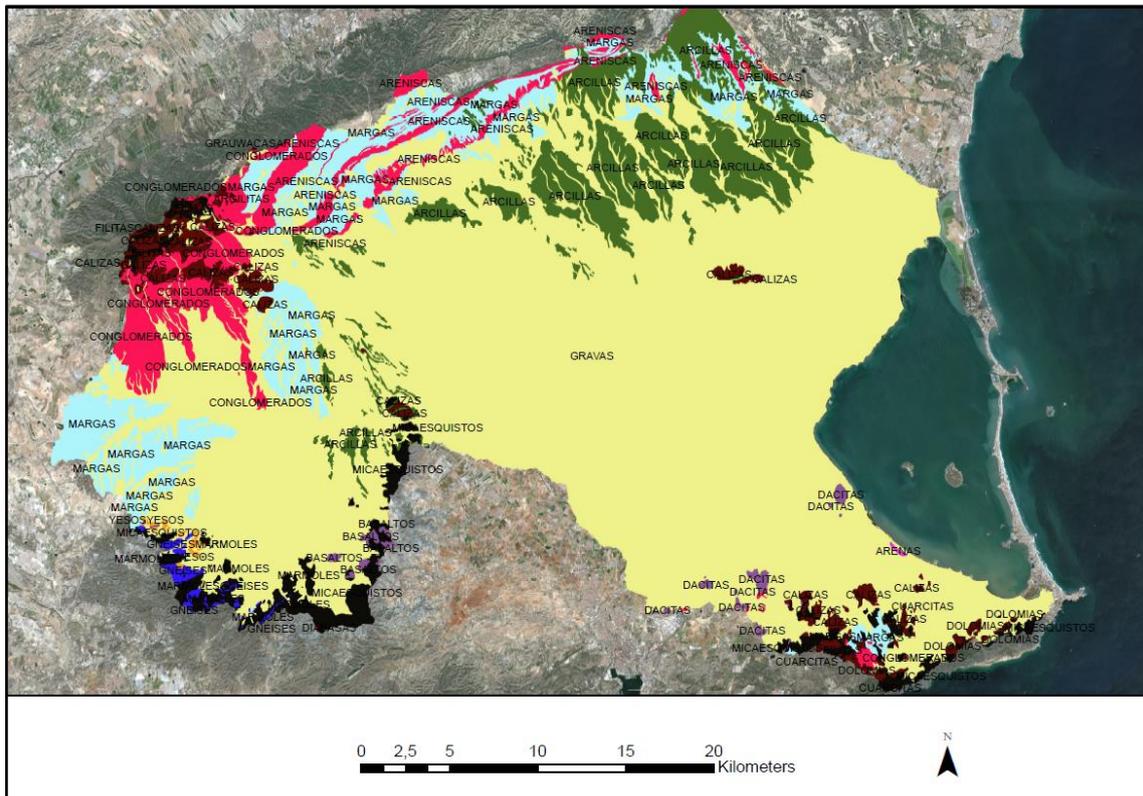


Imagen 28. Litología de la región de estudio. Elaboración propia. Fuente: **Geomicarm**.

Una vez se ha reducido la extensión a la zona de estudio, se realiza un análisis de la misma. De esta manera, resulta más sencillo identificar y clasificar las diferentes litologías presentes. Los materiales encontrados se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Determinación de litologías presentes en la zona de estudio. Elaboración propia.

POLÍGONO	LITOLOGÍA	POLÍGONO	LITOLOGÍA
1	Arcillas	11	Dolomías
2	Arenas	12	Filitas
3	Areniscas	13	Gneises
4	Argilitas	14	Grauvacas
5	Basaltos	15	Gravas
6	Calizas	16	Margas
7	Conglomerados	17	Mármoles
8	Cuarcitas	18	Micaesquistos
9	Dacitas	19	Pizarras
10	Diabasas	20	Yesos

Con la identificación de las diferentes formaciones geológicas presentes, a partir de su origen y formación, estas se clasifican dentro de las clases definidas por el Libro Blanco del Agua para la asignación de un valor de infiltración particular. De esta forma, los veinte diferentes tipos de litología encontrados se han clasificado de acuerdo a la Tabla 18.

Tabla 18. Asignación de valores de infiltración a la litología de la zona de estudio de acuerdo a los valores de referencia proporcionados en el Libro Blanco del Agua. Elaboración propia.

Clases Libro Blanco	Infiltración máxima (mm)	Litología encontrada zona de estudio
Material aluvial de origen indiferenciado	400	Limos y arcillas
Calizas y dolomías	1000	Calizas y dolomías
Margas	85	Margas
Margas yesíferas	75	No corresponde
Yesos	64	Yesos
Materiales arenosos	450	Arenas
Materiales gravo-arenosos	500	Gravas
Calcarenitas	250	Areniscas, argilitas, grauvacas y conglomerados.
Arcosas	150	No corresponde
Rañas	95	No corresponde
Granitos	65	No corresponde
Rocas metamórficas	20	Filitas, mármoles, diabasas, cuarcitas y micaesquistos.
Gneiss	55	Gneises
Pizarras	40	Pizarras
Rocas volcánicas	275	Basalto y dacitas

Con la relación establecida en la Tabla 18 entre la litología de la región de estudio y los valores de infiltración asignados por el Libro Blanco del Agua, se asignan los valores pertenecientes a cada tipo de material. Una vez asignados, se crea una ráster de una resolución de 10x10 metros, que contiene un valor de infiltración máxima para cada tipo de litología de acuerdo a la Tabla 18.

6.2.1.3. Regionalización de los usos del suelo:

Para la elaboración de este apartado, se parte de la afirmación de que, dependiendo del uso del suelo, este tiene una capacidad de depósito de agua particular. Así, se establece que una superficie artificial tiene un valor de almacenamiento inferior que otra cubierta en la que existe vegetación. Esto es lo que se desprende al analizar la Tabla 8, presente en el Capítulo 2.3.1., extraída del Libro Blanco del Agua, en la que se asignan valores particulares de almacenamiento para los principales usos del suelo que se dan en el territorio. La metodología empleada para la asignación de los valores de retención parte de la tabla anterior y de la clasificación mensual de las imágenes satélite realizada. Las nueve clases en las que se han clasificado las imágenes se las relaciona con las superficies definidas en Libro Blanco del Agua y su capacidad de retención, dando como resultado la Tabla 19.

Tabla 19. Asignación de valores de retención máxima del suelo a los usos del suelo de la zona de estudio definidos por clasificación de imágenes satélite de acuerdo a los valores de referencia. Elaboración propia.

Clases Libro Blanco	Humedad máxima(mm)	Clases definidas
Superficies artificiales	40	Industria y Residencial
Espacios con poca vegetación	100	Barbecho
Tierras de labor en secano	155	Secano
Tierras de labor en regadío	215	Huerta e invernadero
Praderas y pastizales naturales	150	No corresponde
Sistemas agrícolas heterogéneos	195	No corresponde
Cultivos permanentes	210	Agrío regadío
Vegetación arbustiva	135	No corresponde
Bosque mixto	220	Monte
Bosques de frondosas y coníferas	230	No corresponde
Zonas húmedas y superficies de aguas artificiales	300	Agua

Al dispone la región de estudio de clima termomediterráneo, los suelos clasificados como monte, están compuestos principalmente por matorral termófilo y bosque esclerófilo en diferentes proporciones García, E. B. (2002). De acuerdo a la Tabla 19, se observa que en el caso vegetación arbustiva el valor de retención máxima del suelo asignado es de 135mm/mes, valor notablemente inferior a los 220mm/mes asignados para bosque mixto. Al tratarse

los usos del suelo clasificados como monte, una relación entre vegetación arbustiva y presencia de pinares, se ha escogido para esta clase un valor de retención de humedad ligeramente inferior al asignado para la clase bosque mixto, eligiendo un valor que representase en mayor medida a la vegetación arbustiva presente. En concreto se ha establecido un valor de 200mm de retención del suelo para la clase definida como Monte. Una vez se han relacionado los valores de humedad con las nueve clases en las que se clasifica el territorio, se han creado doce rásters con los valores de humedad máxima empleados para realizar la simulación. Para la asignación de los valores se ha empleado la herramienta *Raster Calculator*, con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \text{Con}(\text{"Raster.img"} \leq 1), 40, 0) + \text{Con}(\text{"Raster.img"} = 2), 215, 0) + \\ & \text{Con}(\text{"Raster.img"} = 3), 200, 0) + \text{Con}(\text{"Raster.img"} = 4), 210, 0) + \\ & \text{Con}(\text{"Raster.img"} = 5), 215, 0) + \text{Con}(\text{"Raster.img"} = 6), 100, 0) + \\ & \text{Con}(\text{"Raster.img"} = 7), 300, 0) + \text{Con}(\text{"Raster.img"} = 8), 155, 0) \end{aligned}$$

Finalmente, la Imagen 29, muestra el resultado obtenido derivado de la asignación de valores a los usos del suelo definidos para el mes de octubre.

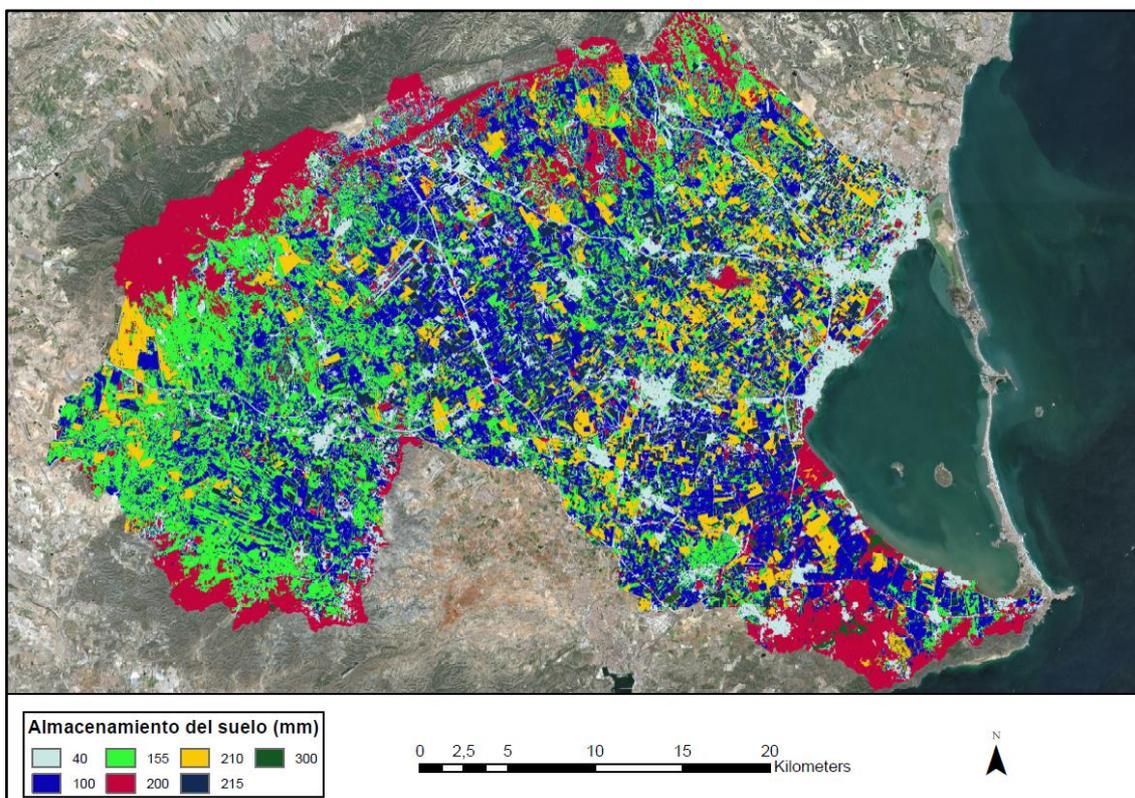


Imagen 29. Representación de los valores de almacenamiento del suelo para el mes de octubre. Elaboración propia.

Sin embargo, el método utilizado presenta un inconveniente. En el caso de presencia de nubes, estas impiden visualizar la superficie, lo que resulta en píxeles clasificados incorrectamente. Aunque se ha tratado que las imágenes descargadas para el proyecto no tuviesen presencia de nubosidad, esto ha resultado imposible para la imagen correspondiente al mes de abril, descargándose aquella con un porcentaje de nubosidad inferior, que se muestra en la Imagen 30.

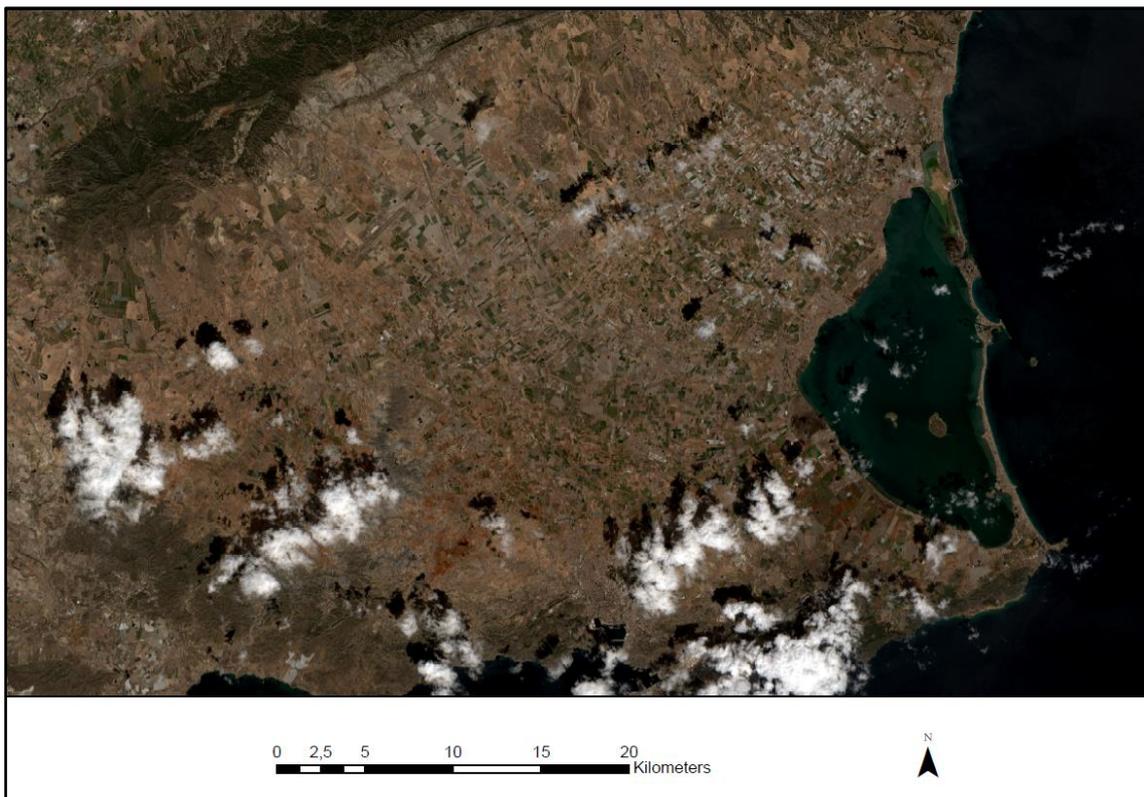


Imagen 30. Imagen satélite correspondiente al mes de abril con presencia de nubosidad. Fuente: Sentinel-2.

Para evitar que los píxeles mal clasificados por las interferencias causadas por las nubes influyan en el modelo hidrológico, se ha aplicado una máscara de nubosidad para evitar que las nubes y sus sombras pudiesen ser clasificadas. Este hecho ha propiciado que, al eliminarse las zonas afectadas por la nubosidad, estas hayan perdido toda la información de la que disponían, apareciendo zonas en las que no es posible identificar/asignar un uso del suelo para el mes de abril. Para ser capaces de asignar el parámetro de reserva de suelo o las necesidades hídricas de regadío en aquellas zonas en las que se

carece de información debido a las interferencias atmosféricas, se ha optado por asignar el mismo uso del suelo que se ha designado en el mes de marzo 2018. Se ha tomado esta decisión y no la eliminación de la imagen correspondiente al mes de abril, debido a la poca superficie afectada por la nubosidad en relación a la extensión total de la imagen. Se ha empleado la imagen de marzo como fuente para la sustitución de los píxeles, debido a su cercanía temporal. Además, tras el análisis de la imagen, se ha descubierto que aquellas zonas con mayor nubosidad se encuentran en zonas montañosas, por lo que los cambios en estas zonas en el espacio temporal de un mes, se esperan reducidos. La Imagen 31, muestra el efecto de la nubosidad sobre la clasificación obtenida.

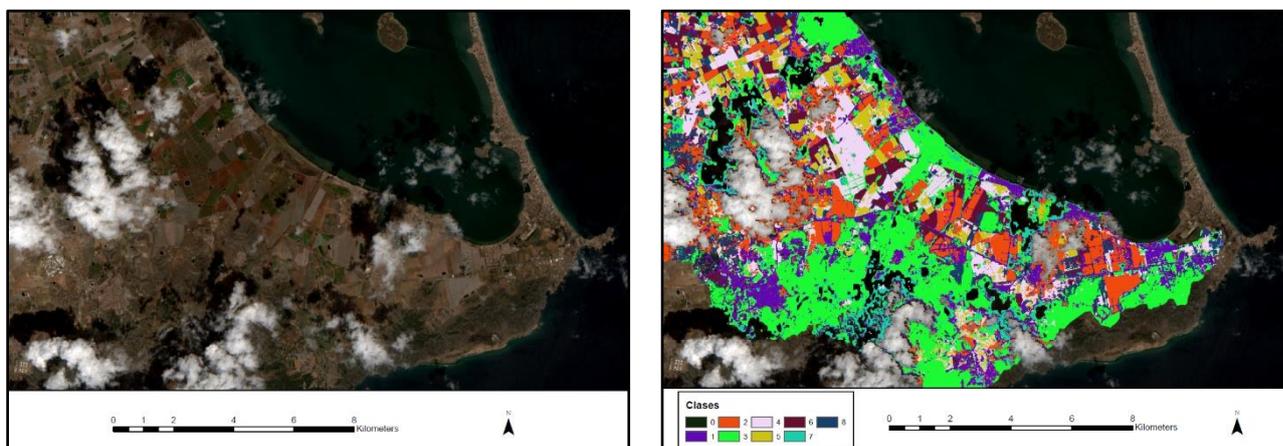


Imagen 31. Efectos producidos por la nubosidad sobre la clasificación, en la zona más afectada de la zona de estudio por las interferencias atmosféricas en la imagen de abril. Elaboración propia.

Como se puede observar en la Imagen 31, falta información perteneciente a las zonas con presencia de nubes sobre la imagen clasificada, lo que deriva posteriormente a que no se pueda asignar un valor de retención al suelo. Para solucionar dicho problema, se ha empleado el siguiente procedimiento:

- En primer lugar, se identifican aquellas zonas que se encuentran afectadas en mayor medida por la nubosidad. Se observa, por la Imagen 30, que la nubosidad de mayor relevancia se circunscribe en la zona sur de la imagen y, de una manera más dispersa en el norte. La zona central se encuentra libre de nubes.

- Una vez se han identificado las zonas con mayor afección, se aplican sobre la imagen las máscaras de nubosidad y sombras. El resultado obtenido, después de la clasificación, se muestra en la Imagen 31, donde se aprecia que aquellas zonas con nubosidad no han sido clasificadas, asignándoles el valor *No Data*.
- Conociendo que a las zonas con nubosidad se les ha asignado un valor *No Data*, se aprovecha esta particularidad para que estas zonas adquieran el valor obtenido en la clasificación realizada para el mes de marzo. Para ello, se emplean las herramientas Reclassify y Raster Calculator.
- La herramienta Reclassify como su nombre indica, vuelve a clasificar los valores de los que está compuesto el ráster de entrada, en nuevos valores conforme a los deseos del usuario. En este caso en particular, se pretende mantener la gran mayoría de valores con los que cuenta la imagen de abril, pero se asigna a los píxeles identificados como *No Data* un valor aleatorio no presente en el resto de clases con las que se ha clasificado la imagen, para realizar cálculos sobre ellos. Los valores adoptados para el nuevo ráster a partir de la clasificación de la imagen de abril se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Valores adoptados en la reclasificación del ráster perteneciente al mes de abril 2018. Fuente: Propia.

Old Values	New Values	Old Values	New Values
0	0	5	5
1	1	6	6
2	2	7	7
3	3	8	8
4	4	No Data	9

- Una vez los valores *No Data* correspondientes al mes de abril son interpretados por el programa con el valor 9, se emplea la herramienta Raster Calculator, utilizando una función condicional. De esta forma, se

especifica al programa que el nuevo ráster creado, adopte los valores que ofrece el ráster de marzo 2018 cuando el valor del píxel del mes de abril sea igual a 9. De igual manera, cuando no se cumpla la anterior condición impuesta, el programa mantiene los valores otorgados para el mes de abril.

- Finalmente, una vez se han asignado los valores pertenecientes al mes de marzo en aquellas zonas en las que la nubosidad impide determinar el uso del suelo en el mes de abril, se asigna el valor de reserva de humedad máxima del suelo. Como se ha visto, este valor depende del uso del suelo establecido y se asignan los valores definidos por el Libro Blanco del Agua en España.

6.2.1.4. Asignación de valores de regadío:

Una de las ventajas que aporta el empleo de la teledetección en la clasificación de los usos del suelo, es la posibilidad de determinar los tipos de cultivo de acuerdo a las necesidades del modelo hidrológico. En este caso, de acuerdo a las clases obtenidas, los cultivos de regadío se pueden clasificar en las clases definidas como invernadero, huerta y agrío regadío.

Se parte de tres clases diferentes en las que se realizan cultivos de regadío, lo que posibilita, asignar una variable denominada como aportación sobre las superficies en las que estos se detecten. Sin embargo, cada superficie de cultivo, representa una variedad diferente, que, dependiendo de su ciclo vegetativo, disposición de cultivo y método de regadío, requerirá una dotación de agua concreta. En este apartado se muestra el proceso con el que se han estimado las dotaciones para los tres tipos de cultivo definidos mediante teledetección.

- ***Determinación de la dotación asignada para agrío regadío.***

Como se ha definido anteriormente, en esta clase se han incluido aquellos cultivos leñosos de regadío, como son el naranjo, el mandarino o el limonero, tratándose todos de cultivos anuales. Para determinar las necesidades de riego

de esta clase, en primer lugar, se necesita determinar la representación sobre el total que tienen cada uno de ellos. Con esta finalidad, se acude a las estadísticas de cultivos que proporciona la Región de Murcia, en el entorno del campo de Cartagena (*Estadística Agraria Región de Murcia 2015/2016*). En ella, aparecen las hectáreas cultivadas de cítricos y frutales en la comarca del Campo de Cartagena.

Tras un análisis y tratamiento de los datos que se exponen en la Tabla 21, respecto a la presencia de cultivos leñosos en la zona del Campo de Cartagena para el periodo 2015-2016, se obtienen las siguientes conclusiones:

Tabla 21. Tratamiento de los datos estadísticos referentes a cultivos leñosos en el Campo de Cartagena. Fuente: Estadística Agraria Región de Murcia 2015/2016. Elaboración propia.

CULTIVO	Campo de Cartagena	Porcentaje	Suma
Limonero	3161	36,43	36,43
Naranja	2104	24,25	60,68
Mandarino	1792	20,65	81,33
Almendro	876	10,10	91,43
Olivar	350	4,03	95,46
Pomelo	99	1,14	96,60
Viveros	88	1,01	97,61
Algarrobo	66	0,76	98,38
Melocotonero	62	0,71	99,09
Viñedos	33	0,38	99,47
Granado	19	0,22	99,69
Kaki	8	0,09	99,78
Ciruelo	6	0,07	99,85
Higuera	3	0,03	99,88
Manzano	2	0,02	99,91
Agave y pita	2	0,02	99,93
Pistacho	2	0,02	99,95
Albaricoquero	1	0,01	99,97
Membrillero	1	0,01	99,98
Níspero	1	0,01	99,99
Peral	1	0,01	100,00
Cerezo	0	0,00	100,00
Nogal	0	0,00	100,00
TOTAL	8677		

1. El limonero es el cultivo leñoso más común en el Campo de Cartagena, con una extensión en el ejercicio 2015/2016 de 3161 hectáreas, que representan el 36,43 por ciento del total de cultivos leñosos.
2. Tras el limonero, se sitúan por extensión los cultivos de naranjos y mandarinos, con una extensión de 2104 y 1792 hectáreas respectivamente, lo que suponen entre ambos una cuota del 44,90 por ciento del total de cultivos leñosos.
3. Entre los tres cultivos leñosos más generalizados del Campo de Cartagena, se logra representar un 81,33 por ciento del total.

Teniendo presentes los anteriores epígrafes y a la vista de que los anteriores tres cultivos representan más del 80% de la variabilidad dentro de la clase denominada como Agrio Regadío, se establecen como los cultivos representativos de la clase, analizándose las necesidades hídricas de cada uno de ellos mediante la aplicación online que dispone el Sistema de Información Agrario de Murcia (SIAM). Para obtener las necesidades hídricas del cultivo de interés, es necesario rellenar diferentes campos de información, tales como la conductividad del agua empleada, el marco de plantación, el tipo de suelo, sistema de regadío empleado...etc. A continuación, se presentan las hipótesis empleadas, siendo estas las más comunes para la zona de estudio, para la estimación de la dotación recomendada:

- Los ejemplares se consideran plenamente productivos con un diámetro de copa de 5,5 metros, encontrándose en un marco de plantación de 6 metros entre plantas y 7 metros entre las diferentes filas, resultando un total de 238 ejemplares por hectárea.
- El sistema de riego empleado es localizado por goteo. Para ello, se han elegido 6 puntos emisores por planta con un caudal emisor de 4l/h.
- Finalmente, las plantaciones se asientan sobre un suelo de textura franco-arcillosa y el agua empleada para el regadío tiene una conductividad eléctrica (CE) de 1,25dS/m.

Limonero:

Se recomiendan riegos mayores de 2 horas y menores de 6 horas. En caso de estar fuera de estos límites agrupar o dividir los riegos. La Tabla 22 muestra las necesidades hídricas del limonero.

Tabla 22. Necesidades hídricas mensuales para el cultivo del limonero. Extraído SIAM IMIDA.

MES	mm/periodo	l/planta periodo	m3/Ha periodo	Horas/periodo	Minutos/periodo
ENERO	0	11	77	0	30
FEBRERO	0	13	90	0	30
MARZO	1	48	356	2	0
ABRIL	2	67	477	2	50
MAYO	2	92	679	3	50
JUNIO	3	108	771	4	30
JULIO	4	173	1.277	7	10
AGOSTO	4	154	1.134	6	20
SEPTIEMBRE	3	123	876	5	10
OCTUBRE	2	83	610	3	30
NOVIEMBRE	1	29	210	1	10
DICIEMBRE	0	9	65	0	20

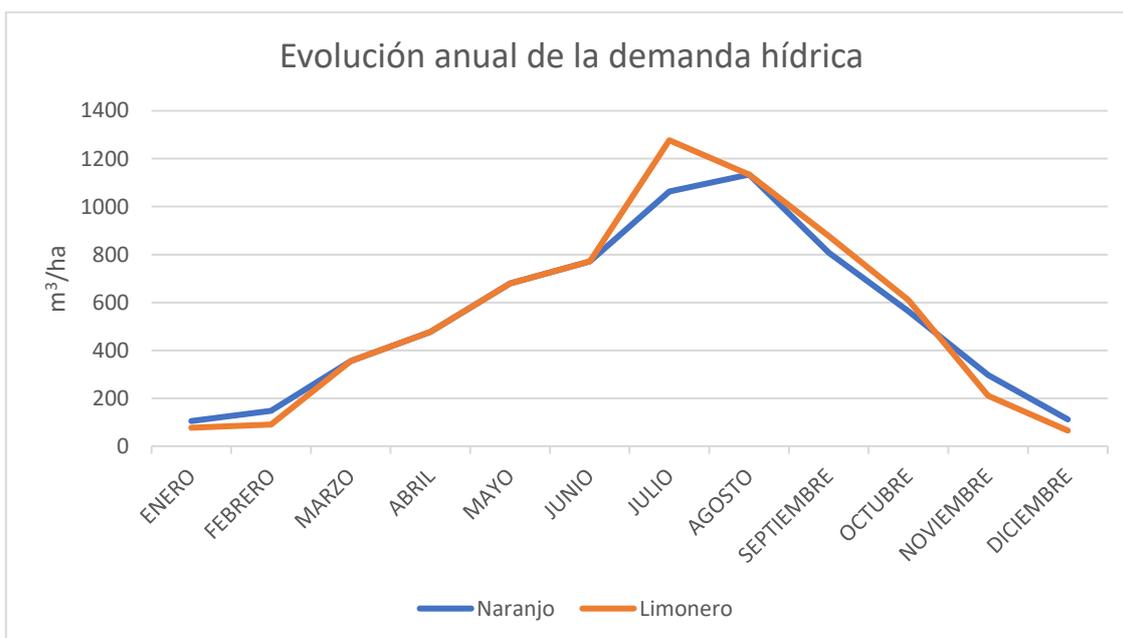
Naranja y Mandarino:

Se recomiendan riegos mayores de 2 horas y menores de 6 horas. En la Tabla 23 se muestran las necesidades hídricas de los naranjos y mandarinos a lo largo del año 2018.

Tabla 23. Distribución de los regadíos en los cultivos de naranja y mandarino. Extraído SIAM IMIDA.

FECHA	mm/periodo	l/planta periodo	m3/Ha periodo	Horas/periodo	Minutos/periodo
ENERO	0	14	105	0	40
FEBRERO	1	22	148	0	60
MARZO	1	48	356	2	0
ABRIL	2	67	477	2	50
MAYO	2	92	679	3	50
JUNIO	3	108	771	4	30
JULIO	3	144	1.063	6	0
AGOSTO	4	154	1.134	6	20
SEPTIEMBRE	3	113	807	4	40
OCTUBRE	2	76	564	3	10
NOVIEMBRE	1	42	297	1	40
DICIEMBRE	0	15	112	0	40

Finalmente, con los datos obtenidos se realiza una comparativa anual para observar la dotación destinada a riegos en los cultivos de limoneros y naranjos o mandarinos en el entorno del Campo de Cartagena. Así pues, en la Gráfica 7 se muestra la evolución de la demanda hídrica entre un cultivo de limoneros y otro de naranjos o mandarinos respecto al tiempo, mostrándose los valores obtenidos en periodo mensual y en m³/ha.



Gráfica 7. Evolución de la demanda hídrica de limoneros y naranjos en el Campo de Cartagena. Fuente: IMIDA

Anteriormente, se ha descrito que los tres cultivos representan el 81,33% de la clase denominada como Agrio Regadío. Dado que son los cultivos más relevantes, el valor de riego mensual en mm/m² adoptado para la clase proviene de los valores asignados para estos. Como la dotación estimada se asemeja entre limoneros, naranjos y mandarinos, pero no es coincidente, se realiza una ponderación sobre base 100 mostrado en la Tabla 24, con la que poder determinar un valor representativo.

Tabla 24. Porcentajes de ponderación empleados. Elaboración propia.

CULTIVO	Extensión (ha)	Porcentaje total	Base 100
Limonero	3161	36,43	44,79
Naranja	2104	24,25	29,81
Mandarino	1792	20,65	25,39

Tabla 25. Dotaciones mensuales asignadas para la clase agrío regadío. Elaboración propia.

Mes	Limonero(m ³ /ha)	Naranja (m ³ /ha)	Valor adoptado (m ³ /ha)	mm/m ²
Enero	77	105	92,46	9,25
Febrero	90	148	122,02	12,20
Marzo	356	356	356,00	35,60
Abril	477	477	477,00	47,70
Mayo	679	679	679,00	67,90
Junio	771	771	771,00	77,10
Julio	1277	1063	1158,86	115,89
Agosto	1134	1134	1134,00	113,40
Septiembre	876	807	837,91	83,79
Octubre	610	564	584,60	58,46
Noviembre	210	297	258,03	25,80
Diciembre	65	112	90,95	9,09

Finalmente, los valores expuestos en la Tabla 25, son los finalmente adoptados para la dotación asignada a la clase definida como Agrío Regadío. La asignación se realiza solamente en aquellas regiones identificadas como tal en la clasificación de la imagen, con la misma metodología empleada para la regionalización de los usos del suelo, creando de esta forma doce rásters, uno para cada mes del año. A modo aclarativo, los píxeles de la región de estudio tienen una resolución de 10x10 metros, y los valores tanto de precipitación, como evapotranspiración y de regadío se aplican sobre la imagen expresados en mm/m². No se trata de un conflicto de dimensiones, puesto que, en el análisis de los resultados del modelo hidrológico, se evalúa la extensión del territorio.

- **Determinación de la dotación asignada para huerta.**

La clase determinada como huerta pretende ser representativa de los cultivos hortícolas producidos al aire libre en la zona de estudio. El método seguido para la estimación de la dotación de esta clase es similar al empleado para cítricos y frutales, ya que se ha recurrido en primer lugar a consultar estadísticas con la finalidad de conocer la importancia relativa de cada cultivo. Los cultivos que se documentan en el Campo de Cartagena y su extensión en hectáreas según la *Estadística Agraria de la Región de Murcia 2015/2016*, elaborada por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Tipos de cultivos hortícolas, extensiones y representación en % del total de variedades cultivadas. Extraído y adaptado de la Estadística Agraria Región de Murcia 15/16.

Cultivo	Extensión(ha)	Porcentaje del total	Suma
Lechuga	3979	20,11	20,11
Patata	3909	19,75	39,86
Melón + Sandía	3169	16,01	55,87
Alcachofa	2801	14,15	70,03
Coliflor y brócoli	2355	11,90	81,93
Pimiento	1188	6,00	87,93
Apio	693	3,50	91,43
Espinaca	372	1,88	93,31
Col	229	1,16	94,47
Escarola	211	1,07	95,53
Perejil	197	1,00	96,53
Haba verde	142	0,72	97,25
Maíz dulce	120	0,61	97,85
Cebolla	114	0,58	98,43
Tomate	104	0,53	98,95
Acelga	51	0,26	99,21
Otras hortalizas	44	0,22	99,43
Puerro	30	0,15	99,59
Boniato	18	0,09	99,68
Judía verde	13	0,07	99,74
Berenjena	11	0,06	99,80
Pepino	9	0,05	99,84
Canónigos	8	0,04	99,88
Guisante verde	6	0,03	99,91
Rúcula	6	0,03	99,94
Cebolleta	4	0,02	99,96
Zanahoria	4	0,02	99,98
Nabo	2	0,01	99,99
Pepinillo	1	0,01	100,00
Ajo	0	0,00	100,00
Espárrago	0	0,00	100,00
Rábano	0	0,00	100,00

Al realizarse un análisis de la Tabla 26 sobre los cultivos que pretende caracterizar la clase Huerta, se observa que de los 32 diferentes cultivos que se pueden encontrar en el Campo de Cartagena, únicamente cinco de ellos representan más del 80% de la extensión total de hortalizas cultivadas. De esta forma, se consideran estos cinco cultivos como representativos de la clase.

A diferencia de los cultivos leñosos, como son el naranjo y el limonero, los cultivos hortícolas de exterior son de temporada y rotativos, es decir, cada uno de ellos tiene una fecha de cultivo y recolección definida, después de la cual, el campo se labra para reposar en barbecho o ser preparado para el próximo cultivo. Por lo tanto, mediante la teledetección, se han detectado diferentes cultivos pertenecientes a la clase huerta y cada uno con una representación diferente dependiendo de la fecha de la imagen. En segundo lugar, se ha realizado una revisión bibliográfica de los cinco cultivos más representativos, determinándose las fechas (mostradas en la Tabla 27) en las que se pueden encontrar en el campo de Cartagena.

Tabla 27. Presencia de los cultivos hortícolas más comunes a lo largo del año. Elaboración propia.

MES	LECHUGA	BRÓCOLI	MELON	PATATA	ALCACHOFA
ENERO	Si	Si	No	Si	Si
FEBRERO	Si	Si	Si (acolchado)	Si	Si
MARZO	Si	Si	Si (acolchado)	Si	Si
ABRIL	Si	Si	Si (acolchado)	Si	Si
MAYO	No	No	Si (acolchado)	Si	Si
JUNIO	No	No	Si	Si	No visible
JULIO	No	No	Si	No	No visible
AGOSTO	No	No	Si	No	No visible
SEPTIEMBRE	Si	Si	No	No	Si
OCTUBRE	Si	Si	No	No	Si
NOVIEMBRE	Si	Si	No	No	Si
DICIEMBRE	Si	Si	No	No	Si

Para la elaboración de la Tabla 27, se ha realizado una síntesis de los trabajos de *Andújar, M., et Al, (2005)*, *Borrego, J. M. (2001)* y *Soria, C. B. (2015)* en referencia al cultivo de alcachofas. *Civera Matamoros, J. A. (2016)* y la *Orden 10 de mayo de 2012 de la Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia* en el caso del cultivo del brócoli. Para determinar el periodo de cultivo de la lechuga, también se ha empleado la *Orden 10 de mayo de 2012* además del artículo de *López Martínez, R., et. Al (2002)*. En el caso de la patata *Hernández, M. C. et. Al. (2005)*. y finalmente para el cultivo de melón y sandía, se ha recogido información de la *Orden de 10 de mayo de 2012* de la consejería en la que se regulan las normas del cultivo de melón y sandía y de la normativa técnica de denominación de origen del melón de Torre-Pacheco.

Analizando la Tabla 27, se observa que la alcachofa se trata de un cultivo anual, puesto que los esquejes empleados para su plantación perduran todo el año en el campo. Sin embargo, durante los meses de verano no se riegan, puesto que se dejan reposar hasta septiembre, momento en el cual se vuelven a iniciar los regadíos de acuerdo al periodo de brotación del cultivo. La patata por su parte, puede cultivarse en dos periodos, uno tardío y otro primerizo. El periodo primerizo es el extendido en el entorno del Campo de Cartagena, puesto que la siembra se efectúa en los meses de enero y febrero y para su periodo de crecimiento hasta junio se requiere de menos recursos hídricos que si su plantación se realizase en meses posteriores. El cultivo del melón se inicia en febrero mediante acolchado y su periodo de recolección comprende los meses de mayo, junio y julio e incluso agosto para las plantaciones tardías. Finalmente, el brócoli y la lechuga comparten el mismo calendario, iniciándose su cultivo en el mes de septiembre y octubre, pudiendo recolectarse y realizarse otra siembra posterior en la misma parcela. Debido a las condiciones climáticas de la zona, aunque se podría realizar, no se cultivan durante el periodo estival.

Una vez realizadas las anteriores aportaciones, se presenta la Tabla 28, en la que se estima el porcentaje de cada tipo de cultivo perteneciente a la clase definida como huerta mediante el empleo de la teledetección. Los porcentajes son estimados, obtenidos a partir de estadísticas y del análisis de la clasificación de las imágenes satélite.

Tabla 28. Estimaciones en % de extensión de cada cultivo sobre el total identificado como Huerta mediante teledetección. Elaboración propia.

MES	Melón	Lechuga	Brócoli	Alcachofa	Patata
Enero	0,00	46,26	23,13	14,98	15,63
Febrero	0,00	47,46	23,73	14,10	14,71
Marzo	0,00	47,21	23,61	14,28	14,90
Abril	0,00	33,04	16,52	24,69	25,76
Mayo	44,60	0,00	0,00	27,11	28,29
Junio	78,43	0,00	0,00	0,00	21,57
Julio	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agosto	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Septiembre	0,00	18,30	9,15	72,55	0,00
Octubre	0,00	48,82	24,41	26,77	0,00
Noviembre	0,00	56,06	28,03	15,90	0,00
Diciembre	0,00	56,14	28,07	15,78	0,00

Finalmente, se ha recurrido al servicio de riegos orientativos que ofrece el SIAM IMIDA, para valorar las necesidades hídricas de cada cultivo según el mes del año. Todos los cultivos se han considerado por goteo, con los marcos de plantación más comunes en el Campo de Cartagena establecidos por la literatura empleada para la Tabla 26 y una salinidad del agua empleada de 1,25dS/m. Con la obtención de los valores de riego obtenidos para cada uno de los cultivos, estos se han ponderado empleando la Tabla 28, obteniéndose como resultado la Tabla 29.

Tabla 29. Dotación mensual asignada a la clase Huerta según la importancia de cada cultivo. Elaboración propia.

MES	Melón	Lechuga	Brócoli	Alcachofa	Patata	m ³ /ha	mm/m ²
Enero	0,00	370,98	86,50	76,72	0,00	534,20	53,42
Febrero	0,00	418,63	101,10	75,42	2,54	597,69	59,77
Marzo	0,00	411,94	192,87	155,81	28,83	789,44	78,94
Abril	0,00	20,81	55,67	319,21	206,46	602,16	60,22
Mayo	533,87	0,00	0,00	376,61	194,90	1105,38	110,54
Junio	1065,88	0,00	0,00	0,00	165,10	1230,97	123,10
Julio	1497,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1497,00	149,70
Agosto	840,00	0,00	0,00	0,00	0,00	840,00	84,00
Septiembre	0,00	322,62	43,37	964,20	0,00	1330,19	133,02
Octubre	0,00	679,05	140,35	249,00	0,00	1068,40	106,84
Noviembre	0,00	530,93	109,89	99,72	0,00	740,53	74,05
Diciembre	0,00	449,71	76,36	93,92	0,00	619,98	62,00

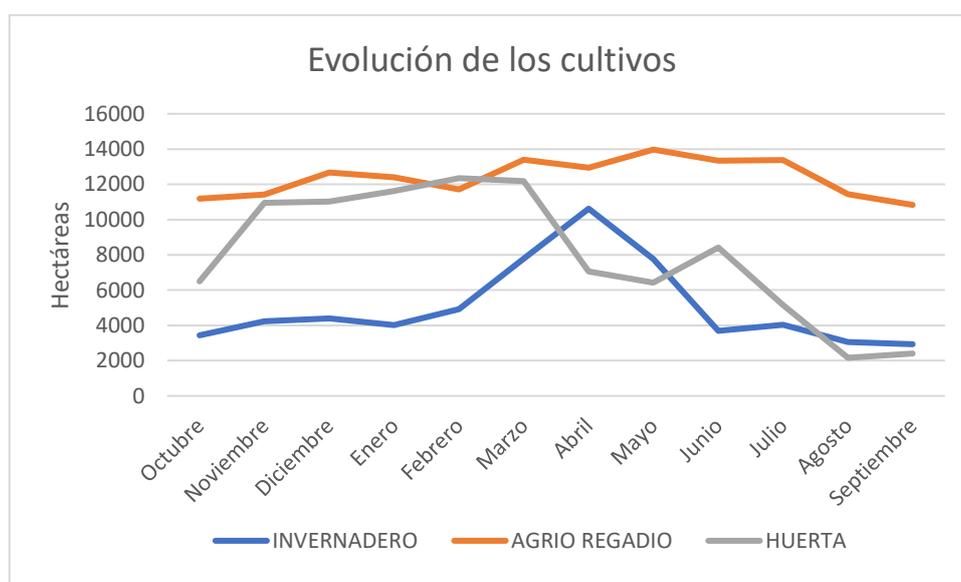
- ***Determinación de la dotación asignada para la clase invernadero.***

La clase invernadero pretende ser representativa de aquellas hortalizas que se cultivan en invernaderos o mediante acolchados. Los invernaderos se tratan de estructuras mayormente permanentes y, por lo tanto, su extensión debe mostrarse prácticamente constante a lo largo del año. Los acolchados, sin embargo, se tratan principalmente de elementos plásticos de reducida duración, que sirven de protección a los cultivos frente a los elementos, siendo principalmente empleados en los cultivos de melones y sandías cuando estos se encuentran en las primeras fases de crecimiento.

Si se analizan brevemente los datos de extensión obtenidos mediante teledetección, se observa que la extensión de la clase de Agrío Regadío se mantiene prácticamente constante a lo largo del periodo de estudio, mostrando un comportamiento estable.

Al analizarse la superficie identificada como Huerta se identifica que la extensión máxima se alcanza en el mes de marzo, momento del fin de los cultivos invernales, para descender en extensión durante los meses de abril y mayo para finalmente recuperarse en el mes de junio a la misma vez que se reduce drásticamente la extensión de Invernadero.

Con este análisis, se detecta un aumento de 6.000 hectáreas en la clase Invernadero. Una explicación probable para este hecho radica en el cultivo de melones y sandías en el entorno del Campo de Cartagena. Estos se siembran con un recubrimiento plástico que los protege en la primera etapa vegetativa de las bajas temperaturas que se alcanzan a primeras horas de la mañana durante los meses de marzo y abril, además de insectos y plagas que puedan afectar a la plantación. Cuando la planta alcanza un desarrollo vegetativo suficiente, se le retira el recubrimiento. Este hecho explica también el incremento que se produce en el mes de junio en la clase determinada como Huerta contraria a la tendencia marcada con el fin de los cultivos de invierno. La Gráfica 8 recoge las anteriores afirmaciones.



Gráfica 8. Evolución de los cultivos identificados mediante teledetección. Elaboración propia.

Una vez se ha identificado que el crecimiento de la clase Invernadero durante el periodo de febrero a junio es debido al cultivo del melón, se consulta la Estadística Agraria de la Región de Murcia 15/16 para determinar la importancia de cada cultivo dentro de la clase invernadero. La Tabla 30 muestran las hectáreas cultivadas de cada cultivo y su importancia relativa.

Tabla 30. Tipos de cultivos bajo invernadero, extensiones y representación en % del total. Extraído y adaptado de la Estadística Agraria Región de Murcia 15/16

CULTIVO	EXTENSIÓN EN HA	PORCENTAJE	SUMA
PIMIENTO	1149	71,59	71,59
CALABAZA Y CALABACÍN	143	8,91	80,50
TOMATE	102	6,36	86,85
VIVERO	68	4,24	91,09
FLORES	53	3,30	94,39
MELÓN	42	2,62	97,01
SANDÍA	15	0,93	97,94
JUDÍA VERDE	11	0,69	98,63
PEPINO	7	0,44	99,07
GUISANTE VERDE	6	0,37	99,44
VIÑEDO	5	0,31	99,75
MANDARINO	4	0,25	100,00
BERENJENA	0	0,00	100,00

En el año 2015-2016, el pimiento representa el cultivo con una mayor extensión en los invernaderos del Campo de Cartagena, concretamente con 1149 hectáreas. Este valor representa el 71,49 por ciento del total de superficie cultivada bajo invernadero. Del resto de cultivos de invernadero, tienen importancia relativa los de calabaza, calabacín y tomate, con una representación porcentual del 8,91 y 6,36 respectivamente.

Teniendo en consideración las anteriores afirmaciones, se extrae que la clase identificada como Invernadero, se encuentra representada principalmente por cultivos de pimientos, melones y sandías, por lo que, para estimar las necesidades hídricas de estos, se requiere en primer lugar identificar su ciclo vegetativo y periodos de cultivo en el entorno del Campo de Cartagena.

Pimiento:

En el entorno del Campo de Cartagena, el cultivo de pimiento en invernadero da inicio en el mes de diciembre, momento en el cual se realiza el trasplante. A partir de diciembre, el ciclo vegetativo del pimiento se puede alargar hasta el mes de septiembre (López-Marin, et Al. 2014). Como se considera el pimiento como cultivo referente de la clase Invernadero, debido a su ciclo vegetativo se trabaja con la hipótesis de que en los invernaderos no se realiza cultivo alguno durante los meses de octubre y noviembre, periodo empleado para el acondicionamiento para el próximo cultivo de pimientos.

Otra hipótesis empleada en este trabajo es que los invernaderos que se encuentran en el Campo de Cartagena son en su mayoría no calefactados. El hecho que no sean calefactados afecta el marco de plantación del pimiento y por lo tanto el número de ejemplares por hectárea y las necesidades hídricas, permitiendo los invernaderos calefactados, una mayor densidad y por lo tanto una mayor demanda hídrica. Fernández, M. D., et Al. (2012).

El marco de plantación recomendado para el pimiento en el entorno del Campo de Cartagena es de 1 metro entre filas y de 0,4 metros entre plantas, resultando en unas 25000 plantas por hectárea. Las necesidades hídricas por hectárea dependen del tipo de suelo, la meteorología, la eficiencia del sistema de regadío empleado y la salinidad del agua empleada. Al igual que con el resto de cultivos, se acude al Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA), estableciendo las siguientes variables y obteniéndose la Tabla 31:

- Cultivo y variedad: Pimiento grueso (invernadero).
- Suelo: Franco-Arcilloso.
- Marco de plantación: 1 metro entre filas y 0,4 metros entre plantas. Total 25000 plantas/ha.
- Fecha de plantación: Diciembre.
- Instalación de regadío: 1 metro entre filas, 1 emisor por planta y 2l hora de caudal emisor.
- Salinidad del agua empleada: 1,25 dS/m.

Tabla 31. Necesidades hídricas del cultivo Pimiento en Invernadero. Fuente: IMIDA

MES	mm/periodo	l/planta periodo	m3/ha periodo	Minutos/periodo
DICIEMBRE	1	0	539	10
ENERO	1	0	567	10
FEBRERO	2	1	651	10
MARZO	3	1	1.251	20
ABRIL	3	1	1.400	20
MAYO	4	1	1.721	20
JUNIO	4	2	1.917	30
JULIO	5	2	2.093	30
AGOSTO	4	2	1.827	20
SEPTIEMBRE	3	1	1.138	20

Melón:

Al igual que el pimiento, las variedades de melón que se siembran en el entorno del Campo de Cartagena empiezan su ciclo vegetativo en un semillero, para posteriormente ser trasplantados desde principios de febrero hasta principios de abril, empezándose a recoger el producto a principios de junio o julio. (Pliego de condiciones de la indicación geográfica 'Melón de Torrepacheco', CARM 2009).

Dependiendo de la fecha de trasplante, se utilizan diferentes técnicas para asegurar que la planta prospere, protegiéndola del frío. Así pues, para aquellas variedades sembradas a principios de febrero, se las protege mediante el empleo de túneles de plástico y acolchados. Conforme se avanza en el tiempo y las condiciones meteorológicas son más favorables para el cultivo, se reducen las protecciones. Así, en el mes de marzo, la siembra se realiza con cubierta flotante de geotextil y acolchado. Por su parte, a partir del mes de abril solamente se emplea el acolchado.

Estos datos sobre la siembra proporcionados en el *Pliego de condiciones de la indicación geográfica 'Melón de Torrepacheco'*, elaborado por el CARM en el 2009, coincide con el análisis previo realizado sobre las imágenes satélite, confirmando la hipótesis de que la clase denominada como Invernadero aumenta su extensión y no es estacional debido al uso de protección geotextil en los cultivos de melón y posteriormente, conforme se avanza en su ciclo vegetativo y aumentan las temperaturas, se le elimina la protección.

En cuanto al marco de plantación y las necesidades hídricas del cultivo, estas dependen principalmente del tipo de melón sembrado. Así, la variedad *Galia* y *Cantoloup* tienen un marco de plantación de 2 metros entre filas y 0,5 metros entre plantas, resultando una densidad de plantación de unas 10000 plantas por hectárea. Por su parte, el melón Amarillo se siembra con una densidad de unas 9000 plantas por hectárea, al igual que el melón Piel de Sapo, cuyas densidades fluctúan desde las 3100 hasta las 10000 plantas por hectárea.

Aunque dependiendo de las variedades empleadas la densidad varía, esta no lo hace de una forma muy elevada, encontrándose normalmente próxima a las 10000 plantas por hectárea. Estimando de esta forma el marco de plantación habitual que se emplea en el Campo de Cartagena, se introducen los siguientes datos en el sistema de riego localizado obteniéndose la Tabla 32:

- Cultivo y variedad: Melón aire libre.
- Suelo: Franco-Arcilloso.
- Marco de plantación: 2 metros entre filas y 0,5 metros entre plantas. Total 10000 plantas/ha.
- Fecha de plantación: Febrero.
- Instalación de regadío: 2 metros entre filas, 1 emisor por planta, 0,5 metros de separación entre goteos y 2 litros hora de caudal emisor.
- Salinidad del agua empleada: 1,25 dS/m.

Tabla 32. Necesidades hídricas del cultivo melón al aire libre. Fuente: IMIDA

MES	mm/periodo	l/planta periodo	m3/ha periodo	Minutos/periodo
FEBRERO	1	1	417	40
MARZO	3	3	834	20
ABRIL	3	3	954	40
MAYO	4	4	1.197	60
JUNIO	5	5	1.359	20
JULIO	5	5	1.497	20
AGOSTO	4	4	840	10

Una vez se han determinado las necesidades hídricas de ambos cultivos, se analiza la extensión estimada mediante teledetección de la clase Invernadero para determinar la importancia dentro de la clase de ambos cultivos estudiados. Tal y como se muestra en la Tabla 33, se establece que el cultivo de pimiento se muestra estable alrededor de las 4000 hectáreas, mientras que el aumento en extensión producido durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo, se debe al cultivo de melón con geotextil.

Tabla 33. Análisis de la extensión de los cultivos que conforman la clase Invernadero. Fuente propia.

MES	INVERNADERO (ha)	PIMIENTO (ha)	MELÓN (ha)	%PIMIENTO	%MELÓN
OCT.	3440	-	-	-	-
NOV.	4227	-	-	-	-
DIC.	4389	4389	0	100,00	0,00
ENE.	4016	4016	0	100,00	0,00
FEB.	4925	4016	909	81,55	18,45
MAR.	7791	4016	3775	51,55	48,45
ABRIL	10621	4016	6605	37,82	62,18
MAY.	7757	4016	3741	51,78	48,22
JUN.	3700	3700	0	100,00	0,00
JUL.	4038	4038	0	100,00	0,00
AGO.	3064	3064	0	100,00	0,00
SEP.	2932	2932	0	100,00	0,00

Tal y como se ha mostrado en las Tablas 31 y 32, las necesidades hídricas del pimiento y el melón que se cultivan en el Campo de Cartagena son distintas entre ellas. A partir del análisis de extensión de cada cultivo empleando la clasificación realizada mediante imagen satélite, se ha logrado estimar la proporción de estos dos cultivos en la Tabla 33. Con las anteriores premisas y debido a la imposibilidad de determinar exactamente que extensión tiene cada cultivo, se ha realizado un promedio de los aportes necesarios de acuerdo a las estimaciones realizadas y las necesidades hídricas de cada cultivo. En la Tabla 34, se muestra el regadío asignado en mm/m² que se aplica a aquellas zonas identificadas como Invernadero a lo largo del período de estudio.

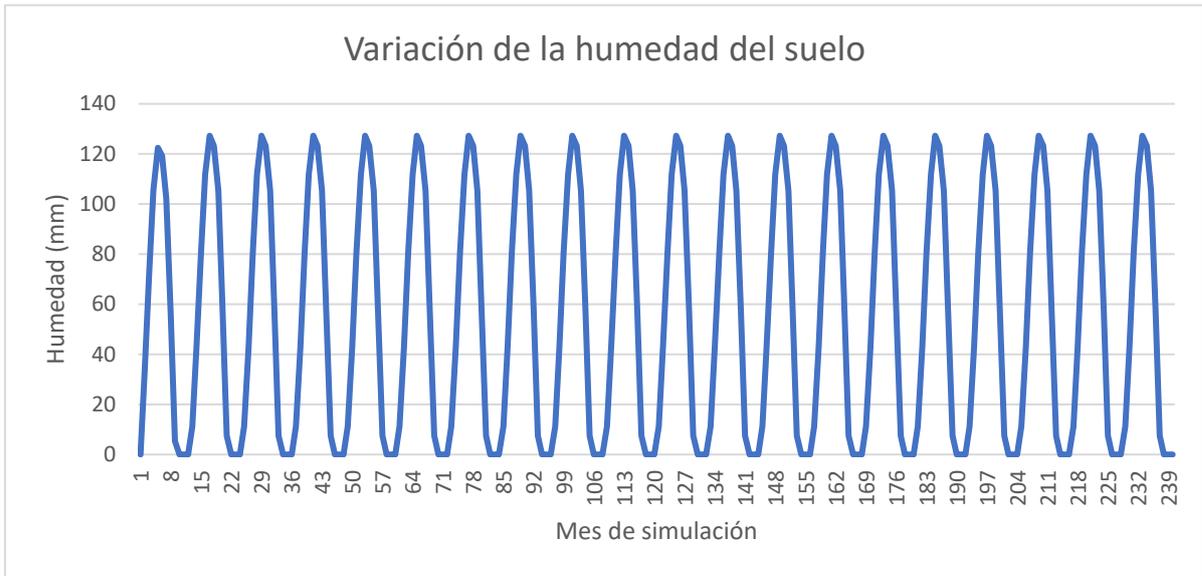
Tabla 34. Determinación del aporte de riego en la clase Invernadero a lo largo del año de estudio.

MES	PIMIENTO (m ³ /ha)	MELON (m ³ /ha)	% PIMIENTO	ASIGNACIÓN (m ³ /ha)	mm/m ²
OCT.	0	0	-	-	-
NOV.	0	0	-	-	-
DIC.	539	0	100	539,00	53,90
ENE.	567	0	100	567,00	56,70
FEB.	651	417	82	607,83	60,78
MAR.	1.251	834	52	1048,96	104,90
ABRIL	1.400	954	38	1122,66	112,27
MAY.	1.721	1.197	52	1468,31	146,83
JUN.	1.917	1.359	100	1917,00	191,70
JUL.	2.093	1.497	100	2093,00	209,30
AGO.	1.827	840	100	1827,00	182,70
SEP.	1.138	0	100	1138,00	113,80

6.2.1.5. Parámetros hidrogeológicos:

Con la obtención de las variables meteorológicas, de reserva del suelo, de infiltración y de aportación por cultivo, faltan determinar tres parámetros de entrada para el modelo, con los que poder iniciar la simulación.

En primer lugar, la humedad inicial (S_i) se establece como nula sobre toda el área de estudio. Se adopta esta decisión puesto que el periodo de simulación es de 20 años, tiempo suficiente para que se alcance un estado estacionario, en el que al final de la simulación no se dependa de los valores de humedad asignados al inicio de la misma. Además, el inicio de la simulación se produce en el mes de octubre, en el que se espera una humedad del suelo relativamente baja, puesto que es el inicio del periodo de precipitaciones después del periodo estival. Ambas hipótesis se reflejan en la Gráfica 8, en la que se muestra que la variación de humedad contenida en el suelo alcanza un valor estacionario al segundo año de simulación y que el valor de humedad del suelo para el mes de octubre se encuentra próximo a cero.



Gráfica 7. Evolución de la humedad del suelo (Si), durante el periodo de simulación. Elaboración propia.

Otro parámetro que se requiere asignar se trata del coeficiente de agotamiento del acuífero (α). Este parámetro caracteriza la descarga de un acuífero en régimen natural que no recibe entradas, mediante la ley exponencial de un manantial que resulta representativo de las descargas totales que realiza el acuífero. El acuífero superior existente en la cuenca de estudio es el acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena, sobre el que descargan las infiltraciones producidas. El valor de coeficiente de agotamiento del acuífero asignado es de $\alpha = 0,02$ (mes^{-1}), obteniéndose del Libro Blanco del Agua.

Finalmente, el último parámetro que requiere de la creación de un ráster que represente la totalidad del área de estudio es el coeficiente de excedente (C). Algunos autores Murillo et. Al (2011), sugieren que este parámetro varía dependiendo de las características fisiológicas de la cuenca. Para este proyecto se ha empleado un valor de $C=0,3$, obtenido del Libro Blanco del Agua.

Con la determinación de las anteriores variables se crean tres rústers diferentes, cada uno con los valores asignados. La creación de los rústers se realiza con las mismas herramientas y procedimientos que se han detallado en anteriores apartados.

6.2.1.6. Pendientes y orientaciones:

Uno de los parámetros que determina el comportamiento de la escorrentía sobre una cuenca, son las características topográficas de la misma, es decir, las pendientes y orientaciones de las mismas. Estos dos parámetros se obtienen a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE), y aunque el objetivo de este proyecto no es modelizar la escorrentía superficial que se produce en la cuenca vertiente al Mar Menor, vista la importancia de los MDE en los modelos hidrológicos, se ha decidido calcular tanto pendientes como orientaciones, para que, en caso de requerirse, calcular la dirección y acumulación del flujo pueda obtenerse con relativa facilidad a partir del modelo Témex desarrollado.

La metodología empleada para la obtención de las pendientes y orientaciones, parte de los MDE descargados (véase Capítulo 5.1.3). Tras la descarga de los mismos, la zona de estudio se encuentra compuesta por diez rásters. Para facilitar el procesado de la información, los diez rásters se unen en uno empleando la herramienta *Mosaic to new Raster*. Esta herramienta permite hacer un mosaico de los rásters de entrada, obteniendo de salida un único ráster. Entre las opciones que la herramienta otorga al usuario para definir el ráster de salida, destacan la proyección geográfica y el valor de profundidad del píxel. La primera se ha establecido como WGS84, al igual que el resto de rásters creados en el proyecto y la profundidad del píxel que define la precisión decimal que adoptan los valores, se ha establecido en 32bit unsigned, con lo que permite obtener valores de cinco o más decimales de precisión.

Una vez se ha realizado la unión de las diferentes hojas, se ha recortado el ráster conforme a la extensión de la región de interés de acuerdo a los parámetros definidos en el apartado 6.1.3, en la sección de recorte de la imagen. Al recortar la imagen, el peso de esta disminuye y se agilizan los procesos, puesto que la información que se trata es únicamente aquella que resulta de interés para el estudio.

Previo a calcular las pendientes y su orientación, hay que recordar que el MDE tiene una resolución de partida de 4x4 y, sin embargo, el modelo creado tiene una resolución inferior, concretamente de 10x10. Por lo tanto, para su posible aplicación en el modelo es necesario que ambos tengan la misma resolución, de

10x10m. Para asignar la resolución definida, se emplea la opción de **Export Data** y en el apartado de *Cell Size*, se modifican los valores existentes por los deseados. Una vez modificada la resolución del ráster, se procede con el cálculo.

Para la obtención de la pendiente, se emplea la herramienta **Slope**, que permite obtener las pendientes en grados de inclinación o en porcentaje. Para el cálculo de la orientación, se emplea la herramienta **Aspect**. Esta herramienta asigna a cada celda el valor correspondiente a las coordenadas geográficas, correspondiendo 0° al Norte 180° al Sur, estando los valores de los píxeles comprendidos entre 0° y 360°. La asignación de la orientación de las pendientes se muestra en la Tabla 35, y las pendientes obtenidas se muestran en la Imagen 32, en la que se pueden distinguir, áreas más abruptas y los cursos de agua.

Tabla 35. Discriminación de los valores del ráster y su correspondiente orientación. Elaboración propia.

Planicie: (-1)	Este: (67,5-112,5)	Suroeste: (202,5-247,5)
Norte: (337,5-22,5)	Sureste: (112,5-157,5)	Oeste: (247,5-292,5)
Noreste: (22,5-67,5)	Sur: (157,5-202,5)	Noroeste: (292,5-337,5)

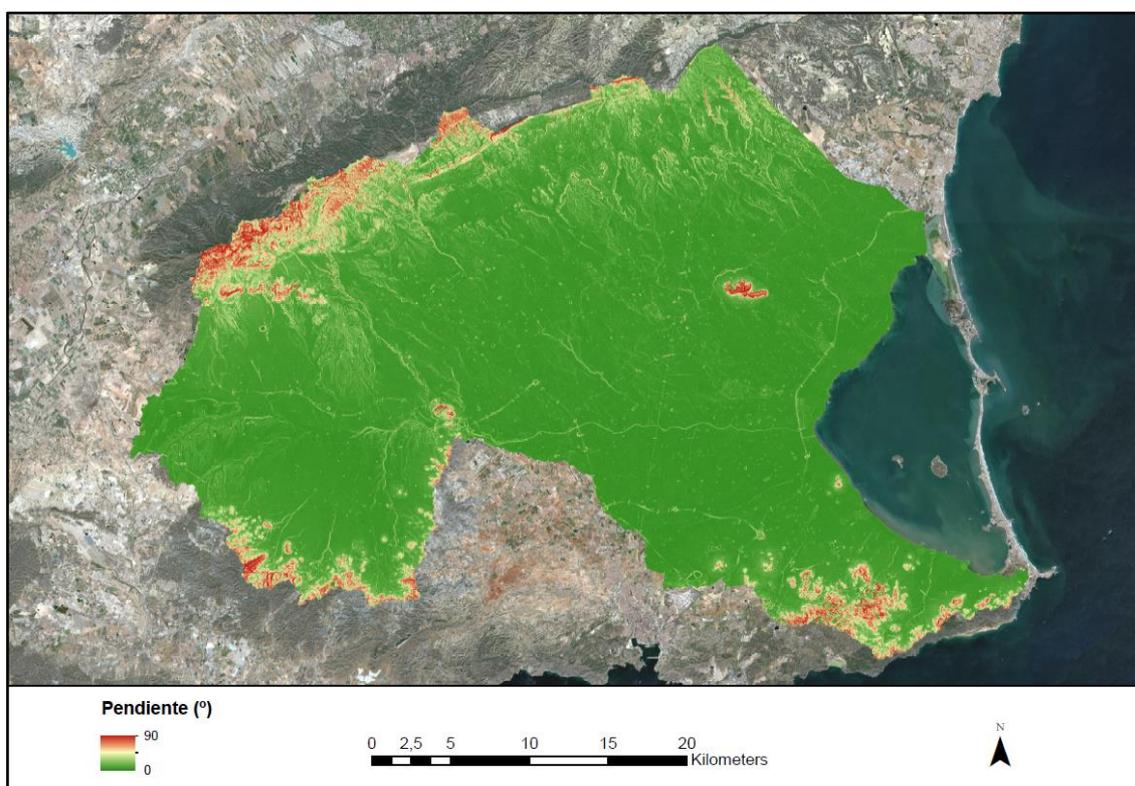


Imagen 32. Muestra de las pendientes en el área de estudio. Los valores rojizos indican terrenos abruptos. Elaboración propia.

6.2.2. Diseño de las ecuaciones y aplicación en los SIG:

Con la obtención y el diseño de los valores de entrada para el modelo, el siguiente proceso corresponde en la transformación de las ecuaciones que rigen el modelo de Témez explicadas en el Capítulo 2, en una sintaxis que pueda ser empleada en los Sistemas de Información Geográfica.

La herramienta utilizada para aplicar las fórmulas es la denominada como **Raster Calculator**. Esta función permite crear y ejecutar expresiones algebraicas sencillas, empleando sintaxis Python en una interfaz similar a la de una calculadora, obteniéndose un ráster como salida del proceso. Con el empleo de esta herramienta, se convierten las ecuaciones de Témez en expresiones Python empleadas para la simulación del proceso. A continuación, se muestra el orden cronológico en la confección de las expresiones, la expresión empleada y su equivalencia con la ecuación del modelo de Témez.

Primera fórmula: (P_0).

```
"Excedente.img" * ("1.Hmax_Octubre2017.img"- "Humedad inicial.img")
```

Segunda fórmula: (δ)

```
"1.Hmax_Octubre2017.img"- "Humedad inicial.img"+ "1.ETP_Octubre.img"
```

Tercera fórmula: (T_i)

```
Con(("1.Precipitacion_Octubre.img">="1.Po.img"),(Power("1.Precipitacion_Octubre.img"- "1.Po.img",2))/("1.Precipitacion_Octubre.img"+ "1.Deficit.img"-2*"1.Po.img"),0)
```

Cuarta fórmula: (H_i)

```
Con((( "Humedad_inicial.img"+ "1.Precipitacion_Octubre.img"- "1.LeyInfiltracion.img"- "1.ETP_Octubre.img")<=0),0, "Humedad_inicial.img"+ "1.Precipitacion_Octubre.img"- "1.LeyInfiltracion.img"- "1.ETP_Octubre.img")
```

Quinta fórmula: (E_i)

Con(((("228.Humedad.img"+"1.Precipitacion_Octubre.img"- "229.LeyInfiltracion.img")>= "1.ETP_Octubre.img"), "1.ETP_Octubre.img", "228.Humedad.img"+"1.Precipitacion_Octubre.img"- "229.LeyInfiltracion.img")

Sexta fórmula: (I_i)

("Imax3.img" * "229.LeyInfiltracion.img")/("Imax3.img"+"229.LeyInfiltracion.img")

Séptima fórmula: (A_{sup})

"3.LeyInfiltracion.img"- "3.Infiltracion.img"

Octava fórmula: (V_i)

"0.Vi.img"*Exp(-"Alfa.img")+ "1.Infiltracion.img"*Exp(-"Alfa.img"*0.5)

Novena fórmula: (A_{sub})

"228.Vi.img"- "229.Vi.img"+ "229.Infiltracion.img"

Antes de su aplicación en los veinte años de simulación del modelo, las anteriores ecuaciones se han comprobado. El método de comprobación ha consistido en contrastar los resultados obtenidos en los rásters con la aplicación de las anteriores expresiones y los obtenidos mediante un Excel con las fórmulas del modelo de Témez con los mismos valores de entrada.

A modo ilustrativo del proceso de validación, se escoge un área en la que existen regadíos arbóreos, se dota de los mismos valores de entrada al Excel (precipitación, regadío, evapotranspiración... etc.) que los empleados en la simulación mediante SIG y finalmente se comparan los valores de salida. En todas las comprobaciones realizadas, ambos métodos han ofrecido el mismo resultado, lo que valida en primera instancia los resultados matemáticos de las ecuaciones propuestas.

6.2.3. Automatización mediante Model Builder:

Una vez se han diseñado las ecuaciones que rigen el modelo en lenguaje de programación, estableciendo las operaciones que se realizan entre los diferentes rásters, se trata de automatizar el modelo. Con la automatización, se pretende en primer lugar disminuir el tiempo de la simulación, evitando introducirse los datos de manera manual. Indirectamente, al automatizarse un proceso repetitivo, también se reducen las posibilidades de que los valores introducidos por el usuario sean incorrectos. Por lo tanto, se considera que la automatización permite liberar recursos y mejorar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Para lograr este objetivo, se ha empleado la herramienta **Model Builder**. Esta se trata de un módulo incluido en el software ArcGis, que permite crear, editar y administrar modelos. Se consideran como modelos, aquellos flujos de trabajo que encadenan una secuencia de herramientas u operaciones y suministran un resultado que puede ser empleado en otra herramienta como una entrada. Se trata, de un lenguaje de programación visual para crear flujos de trabajo, del que se puede extraer el código Python si se desea (ArcGIS for Desktop 2019). Entre las principales virtudes de esta herramienta destacan:

1. Tiene utilidad para la confección y ejecución de flujos de trabajo sencillos, aunque también adjunta métodos avanzados con los que aumentar su funcionalidad además de permitir compartir los modelos creados.
2. Los modelos creados mediante Model Builder se pueden integrar en secuencias de código Python y en otros modelos.

Sin embargo, Model Builder únicamente permite emplear un iterador para cada flujo de trabajo creado. Se considera un iterador, una función que escoge desde un directorio específico los datos que en este se contienen de una manera ordenada, para posteriormente someterlos al flujo de trabajo creado. De esta forma, cuando se agrega un iterador a un modelo, todas las herramientas del modelo se repiten sobre este.

Esta función es especialmente importante para el desarrollo del proyecto, puesto que las operaciones que se emplean en el modelo de Témez son las mismas para cada mes de los veinte años de simulación, por lo que los datos de salida tienen que iterarse y convertirse en datos de entrada para realizar una correcta simulación. Entre las soluciones que se encuentran a la limitación de empleo de un único iterador por modelo planteado es la realización de un modelo anidado. Esta metodología consiste en la integración de un modelo dentro de otro, lo que permite salvar la limitación de un único iterador por modelo, al poder aplicarse un iterador en el submodelo creado y otro en el modelo.

Para la elaboración de este trabajo, se ha creado el modelo anidado que se muestra en la Imagen 33. En la que se puede observar el empleo de un iterador (hexágono naranja) y tres submodelos, nombrados como *IteradorETP*, *Iteradorhumedad* e *Iteradorprecipitacion*, en los que se incluye un iterador en cada uno de ellos.

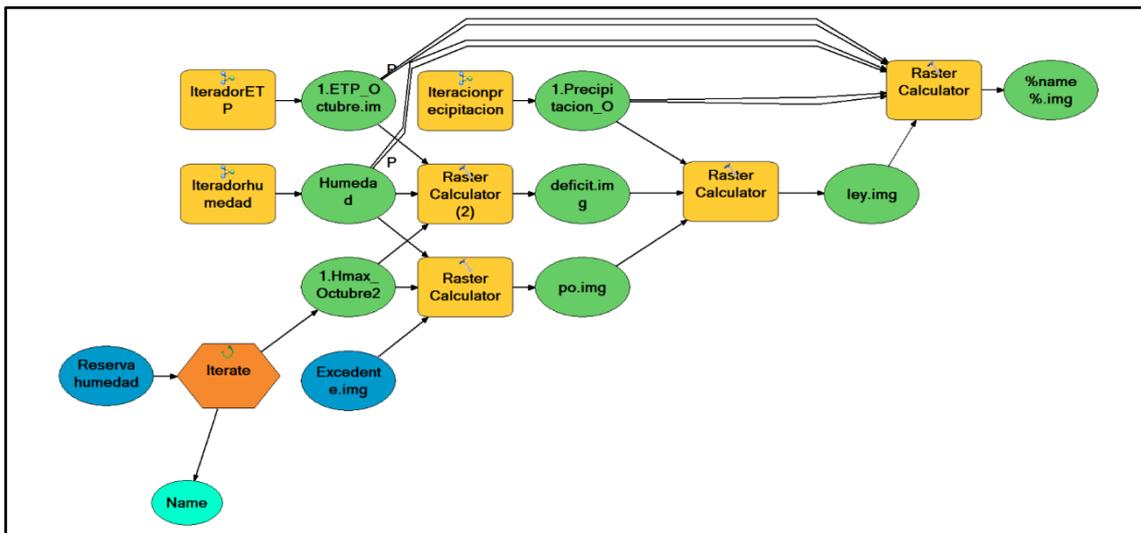


Imagen 33. Modelo creado para la simulación hidrológica. Elaboración propia.

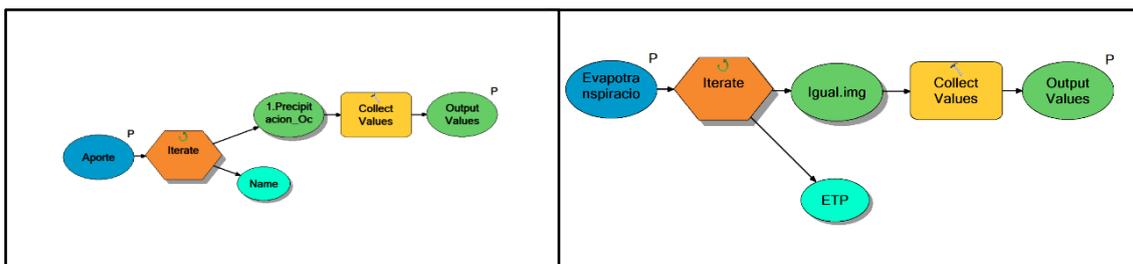


Imagen 34 y 35. Submodelos *Iteradorhumedad* e *IteradorETP* empleados en el modelo. Elaboración propia.

Sin embargo, a pesar de la elaboración de un modelo anidado, en este no se ha conseguido que las variables creadas a la salida de cada submodelo pudiesen retroalimentar al modelo principal. La principal causa resulta por la limitación de emplear un iterador por modelo, además de que no se cuente con unos valores de entrada definidos, sino que estos valores de entrada requeridos son obtenidos por la ejecución del modelo.

En cualquier caso, aunque con Model Builder no se haya conseguido elaborar un modelo que cumpla con el objetivo final de automatizar por completo el proceso ya que se necesita de conocimientos de programación en Python, si se puede semi-automatizar el modelo, de manera que no se deban de escribir manualmente las ecuaciones para cada una de las variables. De esta manera, se reduce la posibilidad de cometer errores en un proceso repetitivo además de reducir la demanda de recursos.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se pretenden mostrar los resultados obtenidos con la metodología empleada. Con la finalidad de mejorar la comprensión de los resultados, estos se han dividido en dos grandes bloques.

El primer bloque se encuentra dedicado a los productos obtenidos a partir de la clasificación de las imágenes satélite. En el se expone de la clasificación de la cobertura de los suelos de acuerdo a las necesidades del modelo hidrológico y los productos derivados de esta, como son la bondad de clasificación, la evolución temporal de la zona de estudio y finalmente la detección de cambios.

El segundo bloque muestra los resultados obtenidos a partir de la elaboración de un modelo hidrológico de Témez mediante los sistemas de información geográfica (SIG). En este apartado se obvia la fase de confección de las variables mediante SIG ya que se considera como correcta al haberse realizado comprobaciones previas a su aplicación. Sin embargo, si se evalúan los resultados obtenidos con la ejecución del modelo, como es la localización de aquellas zonas agrícolas en las que se produce una mayor infiltración debido al regadío, el balance global del suelo de la cuenca vertiente al Mar Menor durante un año hidrológico, la estimación de infiltración y recarga que se produce sobre el acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena y la evaluación de los valores obtenidos con los de otros estudios a modo de validación del modelo. Finalmente se analizan los resultados del modelo creado con los obtenidos mediante un software de simulación hidrológica, con la finalidad de identificar similitudes y divergencias entre ambos.

Finalmente, en el capítulo dedicado a las conclusiones, se expondrán brevemente los principales logros obtenidos, así como las limitaciones detectadas.

7.1. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES

En primer lugar, se ha logrado realizar la clasificación de doce imágenes satélite en nueve clases de acuerdo a las necesidades particulares del modelo hidrológico con una frecuencia temporal mensual a lo largo del año hidrológico 2017-2018. La Imagen 36 muestra un ejemplo de la clasificación realizada, concretamente correspondiente al mes de noviembre de 2017, en el entorno del Mar Menor, correspondiente al monte Carmolí y al municipio de los Urrutias. El total de las clasificadas se ofrecen en el Anejo I.

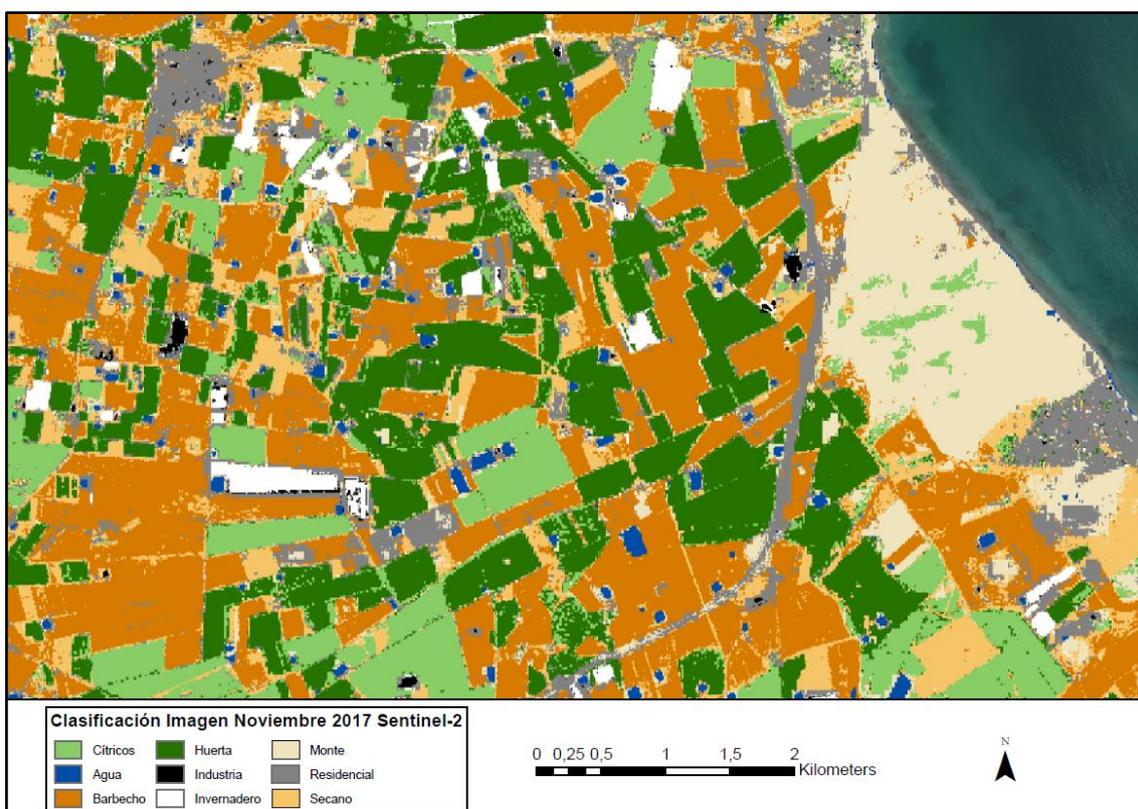


Imagen 36. Clasificación de la imagen Sentinel 2 captada en noviembre 2017. Elaboración propia.

Se ha escogido dicha zona como referencia por la variabilidad que presenta. Por una parte, se encuentran municipios e infraestructuras, una zona montañosa, cultivos de cítricos entremezclados con cultivos rotativos y terrenos para cultivar salpicados por las balsas de agua para su regadío. Como se puede observar en la Imagen 36, esta presenta el fenómeno conocido como “sal y pimienta” debido a que la clasificación ha asignado los píxeles en una determinada clase a partir únicamente de su respuesta espectral, sin tener en cuenta los píxeles vecinos.

Con la premisa de eliminar dicho efecto, tal y como se explica en la metodología, se aplica un filtro mayoritario. La Imagen 37, muestra el efecto de su aplicación mostrando las clases más homogeneizadas, efecto que se puede observar con mayor claridad en el borde izquierdo de la imagen.

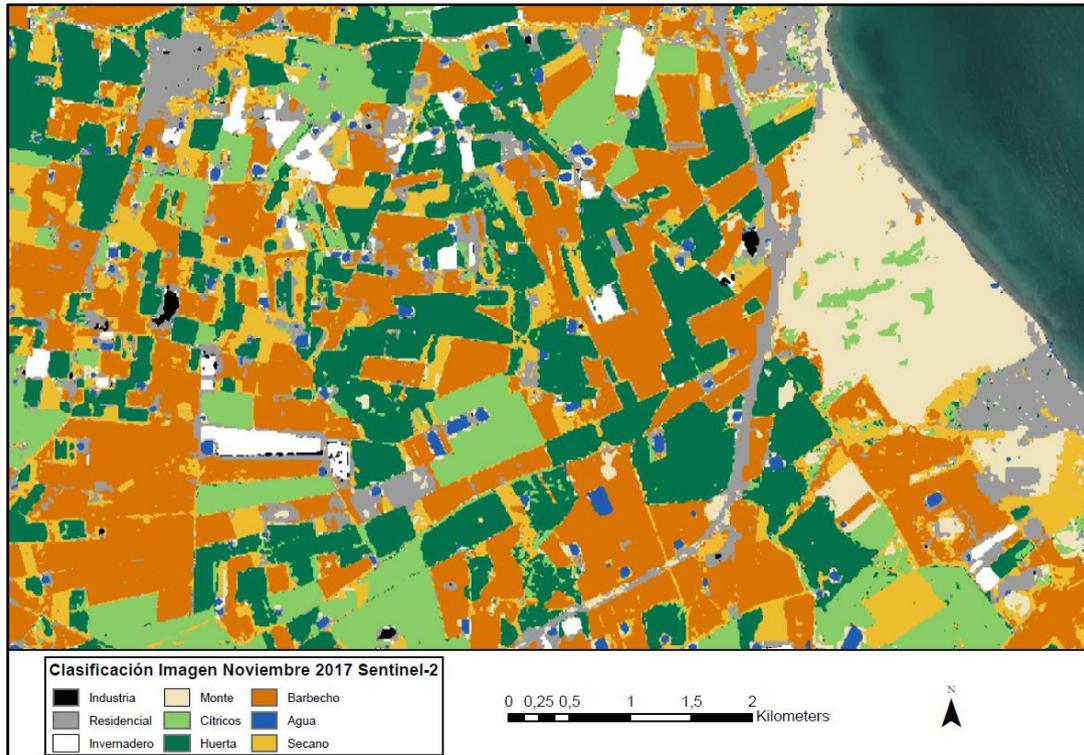


Imagen 37. Resultado tras la aplicación del filtrado. Elaboración propia.

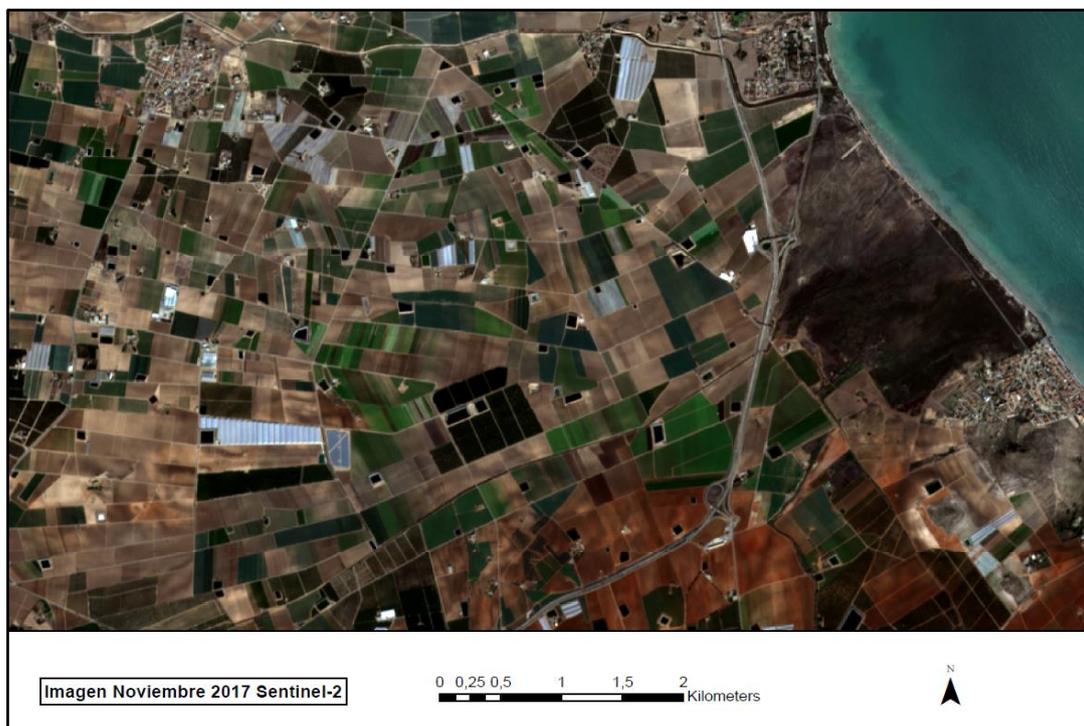


Imagen 38. Composición RGB Sentinel-2 original. Fuente: Open Access Hub.

Finalmente, con la finalidad de que se compruebe visualmente los resultados de la clasificación realizada, se muestra la Imagen 38, tratándose esta de la imagen Sentinel 2 de la que parte la clasificación. En cuanto a las características de las imágenes empleadas, estas se encuentran sometidas a las correcciones geométricas y radiométricas necesarias para realizar una clasificación con garantías, dado que se parte de imágenes nivel de procesamiento L2A, sujetas a los estándares de calidad de la Agencia Espacial Europea (ESA).

7.1.1. Validación de los resultados:

Afirmar que se ha realizado la clasificación de doce imágenes satélite y ofrecer una comparación visual de la misma, no permite evaluar correctamente la metodología empleada y los resultados obtenidos, puesto que se puede inducir a juicios de valor. Lo que para unos puede significar una imagen bien clasificada, para otros, la clasificación obtenida puede no ser buena.

Para dotar de veracidad y rigor a los resultados obtenidos a partir de la clasificación, se requiere de un método estadístico denominado matriz de confusión. Este método, además de aportar respaldo científico a las clasificaciones realizadas, permite igualmente determinar las principales confusiones que se producen entre las clases, así como establecer cuáles de ellas ofrecen mayores garantías. Adicionalmente, la matriz de confusión permite estimar la fiabilidad del usuario, la fiabilidad del productor y el valor estadístico kappa, que indica la probabilidad de haber clasificado correctamente un píxel únicamente por la clasificación realizada, sin contar la probabilidad de que se haya clasificado correctamente aleatoriamente.

La matriz se crea a partir de la clasificación de las imágenes y la comparación de la misma con la verdad terreno tal y como se explica en el Capítulo 6, y con ella se puede ofrecer un valor que indica la calidad de la clasificación realizada, avalando los productos que se pueden derivar de la clasificación de las imágenes como son la evolución del territorio o la detección de cambios. Con la finalidad de otorgar validez a los resultados obtenidos y a la metodología empleada, en el Anejo II, se muestran las matrices de confusión de cada una de las clasificaciones realizadas.

Con la finalidad de ofrecer una referencia global de la clasificación realizada, se han confeccionado las tablas 35 y 36. La Tabla 35 se trata de la matriz de confusión global realizada para las once imágenes que no presentan ningún tipo de nubosidad. Por su parte, la Tabla 36 incluye también la matriz de confusión de la imagen que presenta nubosidad.

Tabla 35. Matriz de confusión global de las once imágenes sin nubosidad. Elaboración propia.

Clase	Ind.	Res.	Inver.	Monte	Agrio	Huerta	Barbecho	Agua	Secano	Total	Fiab. Usuario	Kappa
Industria	437	8	45	38	0	0	64	2	21	615	71%	-
Residencial	6	483	10	41	7	5	36	1	27	616	78%	-
Invernadero	8	22	515	25	3	2	28	1	11	615	84%	-
Monte	8	7	1	555	6	9	18	2	10	616	90%	-
Agrio Regadío	1	4	1	6	539	53	9	0	3	616	88%	-
Huerta	0	2	0	15	45	551	0	0	3	616	89%	-
Barbecho	0	0	0	7	5	1	581	0	22	616	94%	-
Agua	8	20	4	63	0	2	12	506	1	616	82%	-
Secano	0	9	2	35	20	5	153	0	392	616	64%	-
Total	468	555	578	785	625	628	901	512	490	5542	-	-
Fiabilidad Prod.	93%	87%	90%	71%	87%	89%	65%	99%	81%	-	82%	-
Kappa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80%

Tabla 36. Matriz de confusión del conjunto de las imágenes clasificadas. Elaboración propia.

Clase	Ind.	Res.	Inver.	Monte	Agrio	Huerta	Barbecho	Agua	Secano	Total	Fiab. usuario	Kappa
Industria	467	10	50	40	0	2	66	2	26	663	70%	-
Residencial	7	520	11	42	9	5	42	1	29	666	78%	-
Invernadero	10	23	555	27	3	2	29	1	14	664	84%	-
Monte	8	7	1	605	8	9	19	2	11	670	90%	-
Agrio	1	4	1	9	578	66	10	0	3	672	86%	-
Huerta	0	2	0	15	52	600	0	0	3	672	89%	-
Barbecho	1	0	0	8	5	1	635	0	22	672	94%	-
Agua	9	24	4	64	1	2	18	525	4	651	80%	-
Secano	0	9	2	41	21	5	165	0	429	672	64%	-
Total	503	599	624	851	677	692	984	531	541	6002	-	-
Fiabilidad Prod.	93%	87%	89%	71%	86%	88%	65%	99%	80%	-	82%	-
Kappa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80%

Con la elaboración de las matrices, se permite observar el efecto que ha tenido la nubosidad sobre los resultados globales. A la vista de ambas matrices, se puede apreciar que la fiabilidad usuario y la fiabilidad productor, es ligeramente inferior en algunas clases en la matriz que incluye la imagen con nubosidad. Este

hecho indica que la nubosidad ejerce un efecto negativo sobre la bondad de la clasificación, aunque las medidas adoptadas para eliminar la nubosidad han permitido mitigar dicho efecto, haciendo que la clasificación resultante de dicha imagen tenga una validez similar al resto, concretamente el estadístico kappa en la imagen clasificada con nubosidad es de 74% frente al 80% promedio.

Ambas tablas permiten, además, evaluar la elección de las clases y la clasificación de estas. Por obtener los resultados menos satisfactorios, es interesante analizar la clase denominada como **secano**. Esta pretende ser representativa de aquellos cultivos leñosos que se realizan en secano como es el caso de los almendros. A la vista de los resultados obtenidos, esta clase presenta una elevada confusión con la clase barbecho, habiéndose clasificado de los 672 puntos de control totales, 429 correctamente y 165 en la clase barbecho. Al analizar el resultado detalladamente, se determina que es debido a la escasa diferencia espectral existente entre ambas clases y las características comunes que presentan. Por su parte, los cultivos de secano se siembran en un amplio marco de plantación, normalmente con suelo labrado alrededor y además en el caso particular de los almendros, estos son de hoja caduca y presentan una reducida densidad foliar, lo que espectralmente induce a un pequeño aumento de la reflectividad en el infrarrojo cercano. Por su parte, un campo que se encuentra en barbecho, puede presentar vegetación herbácea escasa, que por lo observado en los resultados obtenidos puede inducir a un pequeño aumento en la reflectividad del infrarrojo cercano y a la confusión entre ambas clases. También es interesante observar que dicha confusión no es recíproca y el 90% de los puntos de control empleados en la clase barbecho se encuentran bien clasificados.

De este pequeño análisis se extrae, que las clasificaciones obtenidas representan una mayor extensión de la clase secano en detrimento de la clase barbecho, siendo esta probablemente infraestimada.

Los resultados obtenidos en el resto de clases, son generalmente buenos, con valores superiores al 70% de fiabilidad y generalmente próximos al 90%. Destacan los resultados obtenidos en la clasificación de los cultivos, clases especialmente sensibles para la realización del modelo hidrológico puesto que

se les asigna una componente de regadío, obteniéndose fiabilidades del 89% en la clase **huerta** y del 86% para **agrío regadío** tanto en fiabilidad usuario como fiabilidad productor.

Por su parte, las clases que teóricamente tienen una reducida extensión sobre el resto, como es el caso de la clase **agua** que representa generalmente las balsas y humedales en el Campo de Cartagena e **industria** que representa el tejido industrial, tienen una fiabilidad de clasificación buena pero ligeramente inferior al resto de clases. En este caso, con la elaboración de un análisis de respuesta espectral entre ambas clases frente al resto, se observa que existen grandes diferencias, encontrándose solamente un poco de similitud entre industria e invernadero. La explicación encontrada para la obtención de unos valores de fiabilidad ligeramente inferiores al resto, reside en el método empleado para distribuir la muestra de control. En este proyecto se ha empleado la opción *Equalized Stratified Random*, que crea los puntos de control y los distribuye aleatoriamente en cada clase, teniendo cada clase el mismo número de puntos independientemente de su tamaño.

Este hecho, ha originado que estas dos clases, con una extensión notablemente reducida frente al resto, se encuentren sujetas proporcionalmente a un mayor control, lo que deriva en los resultados obtenidos. Sin embargo, debido a la similar extensión entre el resto de clases este efecto no se observa. A la vista de los resultados de fiabilidad obtenidos en las matrices de confusión y la influencia de la distribución de la muestra para la realización de la matriz, en este proyecto se recomienda emplear el método *Equalized Stratified Random* en aquellas imágenes en las que las diferentes clases definidas por el usuario tengan una extensión similar, utilizándose en los demás casos una distribución de la muestra de acuerdo al porcentaje de extensión de cada clase.

Finalmente, el valor estadístico kappa obtenido es del 80%. Este valor indica que el 80% de los píxeles clasificados se han asignado en la clase correcta sin contar el efecto del azar, lo que corresponde a un resultado substancial o cuasi perfecto de acuerdo a la escala establecida por Landis J.R., Koch G.G. (1977).

7.1.2. Evolución de los usos del suelo en el Campo de Cartagena:

Una vez se ha realizado la clasificación digital y se han obtenido las imágenes categorizadas con la validación de cada una de ellas, se procede a obtener los productos derivados de la misma. Uno de los productos que se pueden obtener con el análisis de las imágenes clasificadas es un inventario de los usos del suelo, de acuerdo a las nueve clases definidas. La Tabla 37, muestra el inventario realizado para el mes de octubre de 2017, estando la extensión de cada clase expresada en hectáreas (ha).

Tabla 37. Inventario de los usos del suelo para el mes de octubre 2017. Extensión expresada en hectáreas.

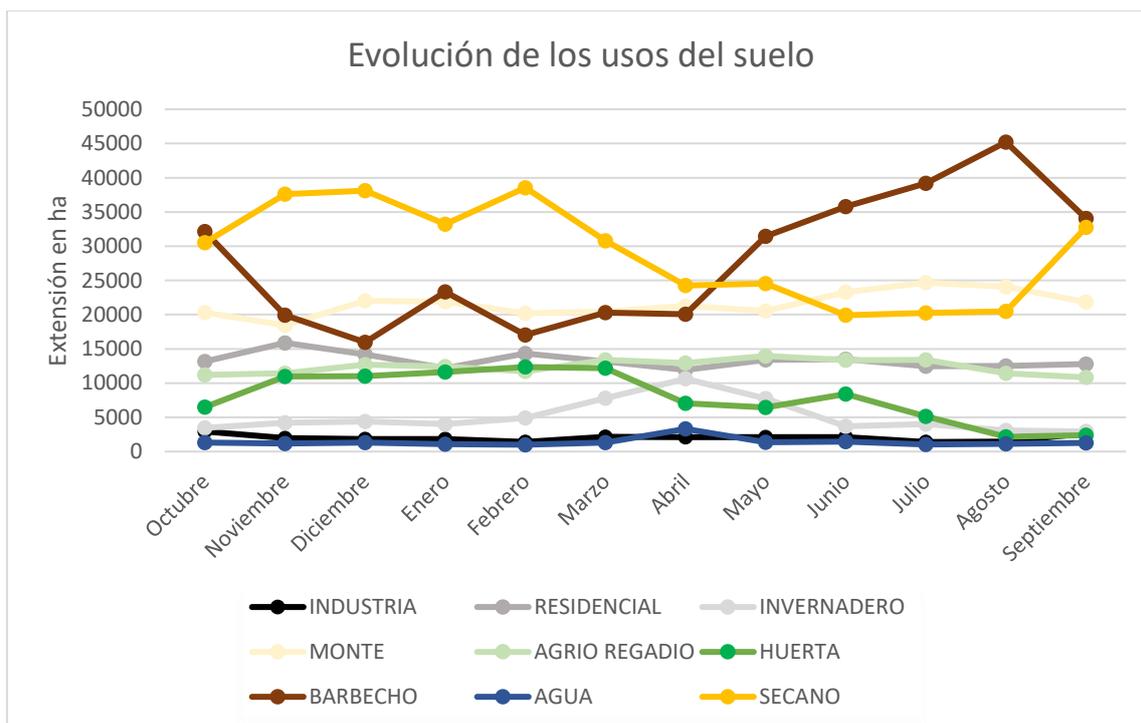
	INDUSTRIA	RESIDENCIAL	INVERNADERO	MONTE	AGRIO REGADIO	HUERTA	BARBECHO	AGUA	SECANO
Oct.	2935,10	13182,88	3439,86	20305,05	11183,10	6502,59	32151,01	1310,25	30527,53

Como se puede observar en la Tabla 37, para el mes de octubre la mayor extensión corresponde con 32151 hectáreas a la clase barbecho, representando un 26% del total de la imagen clasificada. Muy próxima en extensión se encuentra la clase secano, con 30527 hectáreas que representan el 25% del total de la imagen. Entre ambas clases suman más de un 50%, lo que significa que más de la mitad del área de estudio dispone de poca o nula vegetación en el mes de octubre 2017. Por otra parte, destacan por su reducida extensión las clases referentes a agua 1,1% del total, industria 2,4% e invernadero 2,8%. El inventario realizado para la imagen de octubre, se puede extender al total de las imágenes clasificadas, obteniéndose la Tabla 37.

Tabla 37. Evolución en hectáreas de las clases a lo largo del año hidrológico 2017-2018.

	INDUSTRIA	RESIDENCIAL	INVERNADERO	MONTE	AGRIO REGADIO	HUERTA	BARBECHO	AGUA	SECANO
Oct.	2935,10	13182,88	3439,86	20305,05	11183,10	6502,59	32151,01	1310,25	30527,53
Nov.	1953,03	15882,19	4226,82	18447,89	11413,57	10947,07	19918,08	1153,29	37594,95
Dic.	1811,94	14209,62	4389,11	22021,97	12678,17	11030,25	15961,62	1298,73	38133,00
Ene.	1813,19	12187,65	4016,31	21893,54	12400,55	11619,65	23341,76	1063,54	33196,54
Feb.	1421,36	14320,62	4924,81	20206,02	11716,81	12350,12	17047,00	998,77	38549,19
Mar.	2167,43	13181,98	7791,27	20417,24	13391,16	12190,90	20319,63	1305,48	30769,75
Abr.	2113,88	11928,22	10620,90	21296,73	12944,98	7052,15	20083,13	3305,20	24280,49
My.	2104,57	13394,70	7756,99	20553,08	13971,36	6421,23	31421,07	1383,40	24527,51
Jun.	2101,58	13503,44	3699,55	23301,74	13332,97	8420,90	35801,85	1463,78	19911,67
Jul.	1389,81	12452,59	4037,60	24676,72	13371,01	5159,22	39166,30	1017,91	20261,54
Ag.	1457,98	12484,47	3063,75	24091,71	11442,40	2161,95	45212,82	1145,03	20475,22
Sept.	2659,98	12778,43	2932,13	21832,09	10833,68	2399,72	34065,87	1269,00	32763,18

Finalmente, con la realización de un inventario para cada imagen ordenada cronológicamente, se puede identificar la variación de extensión de cada clase de manera mensual, logrando estimar la evolución de los usos del suelo con facilidad a lo largo del año estudiado. La Gráfica 8 muestra la evolución de los usos del suelo en la región de estudio.



Gráfica 8. Evolución de los usos del suelo en hectáreas a lo largo del año hidrológico 2017-2018. Elaboración propia.

Como se puede observar en la Gráfica 8, existen unas clases que presentan una mayor variabilidad temporal que otras. Según la definición de las clases, es esperable que *Industria*, *Agua*, *Residencial* y *Agrío Regadío* se mantengan prácticamente constantes a lo largo del periodo de estudio y así se observa en la gráfica realizada. Esto se debe a que, en condiciones normales, estas clases requieren de un periodo de tiempo mayor entre imágenes que el resto para mostrar diferencias de extensión significativas. Por el contrario, las clases de *Secano*, *Monte*, *Invernadero*, *Barbecho* y *Huerta*, muestran dinamismo en el periodo temporal abarcado por este estudio. A continuación, se presenta una breve explicación de los factores observados que intervienen en el dinamismo de dichas clases.

- La clase huerta y barbecho son clases dinámicas puesto que se tratan de terrenos sometidos a cultivos hortícolas estacionales, llegando a realizarse hasta tres plantaciones anuales en una misma parcela, alternando periodos de barbecho con los de cultivo.
- Invernadero. Se observa una evolución constante alrededor de las 5000 hectáreas a lo largo del año, a excepción de los meses de febrero, marzo, abril y mayo, en los que se alcanza un pico de 10000 hectáreas debido principalmente al cultivo de melones y sandías mediante cubierta flotante.
- Secano y barbecho. Ambas clases presentan una extensión irregular a lo largo del año. Secano, pretende ser representativa de aquellos cultivos que se realizan en secano y zonas de reducida vegetación. Barbecho, pretende determinar aquellas zonas que se encuentran labradas y sin ningún tipo de vegetación. En la Gráfica 8 se observa una variación considerable entre ambas clases, sin embargo, esta variación sigue un patrón: En el periodo de mayor humedad, aumenta la clase correspondiente a Secano y en el periodo estival aumenta la clase de Barbecho. Este hecho se debe, a que, en el periodo de mayor humedad, existe un mayor vigor en la vegetación y se puede clasificar en la clase de secano. Sin embargo, durante el periodo estival en el que se produce una ausencia de precipitaciones, la mayoría de campos quedan sin vegetación, lo que hace que se clasifiquen en la clase barbecho.
- Agrio regadío. Caracteriza principalmente los cultivos de cítricos, aunque también se pueden representar cultivos de frutales. Presenta un reducido dinamismo puesto que son cultivos leñosos, en los que su desarrollo se demora a años.
- Agua. Caracteriza las balsas y acumulaciones de agua. Debido al ritmo de construcción de las mismas, esta clase no presenta dinamismo alguno.

- Industrial y Residencial. Representan vías de comunicación, tejido industrial y urbano. Presentan un reducido dinamismo puesto que el espacio temporal evaluado es muy reducido.
- Monte. Se trata de una clase que debe estar sujeta a reducida variabilidad, a excepción que se produzcan incendios forestales significativos, hecho que no ocurre durante el periodo de estudio. La variación de extensión obtenida en la Gráfica 8 corresponde con el planteamiento teórico planteado, observándose pequeñas variaciones, debidas principalmente a las condiciones climáticas del mes evaluado.

7.1.3. Detección de cambio en los usos del suelo:

Finalmente, otro de los productos derivados de la clasificación de imágenes satélite, es la detección de cambios en el territorio (Anejo III). Este proceso permite identificar la variación de extensión de una clase en un periodo de tiempo y de esta manera aumentar la comprensión de la evolución del territorio. Además, en este proyecto, debido al escaso periodo temporal entre imágenes y las características particulares de las clases, permite identificar las limitaciones de las clasificaciones realizadas e identificar causas probables.

La detección de cambios se realiza mediante la comparación de dos imágenes clasificadas, a partir de las cuales se elabora una tabla multitemporal en la que se exponen las variaciones en superficie y porcentaje de las clases definidas. En la diagonal de la matriz creada, se enfrentan las mismas clases en diferentes periodos de tiempo obteniendo en la diagonal aquella superficie en la que no se detecta cambio alguno. Además, la elaboración de la matriz permite identificar cual ha sido la dirección del cambio, es decir, la clasificación del píxel de origen y la clasificación final que adquiere.

Para la validación de los resultados obtenidos mediante la detección de cambios, se procede a calcular el promedio de fiabilidad de cada una de las clases a partir de la matriz de confusión de cada imagen. La detección del cambio realizada en este proyecto se ha realizado a partir de las clasificaciones obtenidas para octubre y noviembre de 2017, mostrándose en la Tabla 38 la validez obtenida.

Tabla 38. Validez para la detección de cambios entre las clasificaciones de octubre y noviembre de 2017.

Categoría	Fiabilidad Productor	Error Comisión	Fiabilidad Usuario	Error Omisión
Industria	80%	20%	53%	47%
Residencial	71%	29%	55%	45%
Invernadero	87%	13%	55%	45%
Monte	42%	58%	73%	27%
Cítricos	79%	21%	85%	15%
Huerta	88%	12%	86%	14%
Barbecho	37%	63%	88%	12%
Agua	95%	5%	57%	43%
Secano	62%	38%	43%	57%
Fiabilidad Global= 66%		Índice Kappa= 61%		

Al tratarse la fiabilidad global del producto de las fiabilidades de las clasificaciones individuales, el valor de fiabilidad obtenido es del 66%, tratándose de un valor inferior al 81% obtenido para las imágenes de octubre y noviembre. Respecto al indicador Kappa, este pasa del 78 y 79% hasta el 61%, indicando que la detección de cambios obtenido es un 61% mejor que el resultado esperable al azar. Analizando detalladamente la Tabla 38, se observa que los mejores resultados para la detección de cambios, se obtienen en las clases huerta, invernadero y cítricos con valores de fiabilidad alrededor del 80 y 90%. Sin embargo, es de esperar que los resultados menos acertados se produzcan en la clase secano, con una fiabilidad productor del 62% y una fiabilidad usuario del 43%. Una vez determinada la validez de la detección de cambios realizada en el territorio, se presentan en las Tablas 39, 40 y 41 los resultados obtenidos.

Tabla 39. Inventario de la superficie detectada con cambios o sin ellos.

	Porcentaje del total	Superficie en hectáreas
Sin cambios	65,10%	79115,48
Con cambios	34,90%	42415,02
Total	100,00%	121530,50

Tabla 40. Matriz de cambios en hectáreas para la región de estudio en el periodo octubre-noviembre 2017.

OCTUBRE 2017	NOVIEMBRE 2017									
		AGUA	BARBECHO	CÍTRICOS	HUERTA	INDUSTRIA	INVERNADERO	MONTE	RESIDENCIAL	SECANO
	AGUA	827,29	8,69	3,40	33,92	20,08	13,18	164,87	231,26	5,86
	BARBECHO	47,45	15148,85	227,92	2522,62	328,49	311,99	809,07	1972,39	10781,63
	CÍTRICOS	7,07	43,96	9401,31	454,78	0,25	77,87	194,47	413,70	589,59
	HUERTA	10,49	137,51	598,92	4469,39	2,93	156,85	148,97	453,39	524,05
	INDUSTRIA	21,14	452,52	10,08	35,93	980,65	374,65	32,43	688,53	338,81
	INVERNADERO	5,03	131,59	8,05	68,22	149,34	2499,53	49,81	310,78	217,42
	MONTE	139,97	529,23	244,04	486,40	27,64	129,80	15462,52	1325,25	1957,77
	RESIDENCIAL	87,85	886,93	66,30	391,83	232,10	459,33	476,79	8863,96	1716,81
SECANO	6,69	2578,62	853,30	2483,78	211,31	203,46	1106,99	1620,87	21461,98	
CAMBIO	-155,57	-12232,51	230,32	4444,36	-981,96	786,89	-1856,71	2698,23	7066,95	

Tabla 41. Matriz de cambios para la región de estudio, en porcentaje por clases.

OCTUBRE 2017	NOVIEMBRE 2017									
		AGUA	BARBECHO	CÍTRICOS	HUERTA	INDUSTRIA	INVERNADERO	MONTE	RESIDENCIAL	SECANO
	AGUA	63,22	0,66	0,26	2,59	1,53	1,01	12,60	17,67	0,45
	BARBECHO	0,15	47,12	0,71	7,85	1,02	0,97	2,52	6,13	33,53
	CÍTRICOS	0,06	0,39	84,07	4,07	0,00	0,70	1,74	3,70	5,27
	HUERTA	0,16	2,11	9,21	68,73	0,05	2,41	2,29	6,97	8,06
	INDUSTRIA	0,72	15,42	0,34	1,22	33,41	12,77	1,11	23,46	11,54
	INVERNADERO	0,15	3,83	0,23	1,98	4,34	72,67	1,45	9,03	6,32
	MONTE	0,69	2,61	1,20	2,40	0,14	0,64	76,16	6,53	9,64
	RESIDENCIAL	0,67	6,73	0,50	2,97	1,76	3,48	3,62	67,24	13,02
SECANO	0,02	8,45	2,80	8,14	0,69	0,67	3,63	5,31	70,30	

Al analizar las gráficas anteriores, se observa que el territorio del entorno del Campo de Cartagena cuenta con un elevado dinamismo, estimándose un cambio en los usos del suelo de un 35% respecto al mes de octubre del 2017 al mes de noviembre del mismo año. Sin embargo, ¿puede ser tal magnitud de cambio posible en un espacio temporal tan corto? Para responder a la anterior pregunta, a continuación, se analizan las principales deducciones que se extraen al analizar las diferentes clases en las que se divide el territorio.

1. Análisis de las clases agua e industria. A nivel de extensión en el territorio, son las menos influyentes, puesto que ambas no suman más del 4% de la extensión. Sin embargo, los resultados que se extraen son particulares. En el

caso de Industria, una clase que mensualmente debe tener variación reducida por lógica, únicamente permanece un 33% de la extensión inalterable entre los meses de octubre y noviembre, destacando el cambio hacía las clases residencial y barbecho, con 23% y 15% respectivamente. En búsqueda de explicación del comportamiento de dicha clase, se puede referir a la fiabilidad de la detección del cambio obtenida para estas tres clases, así como las características de los polígonos industriales, en los que se entremezclan solares que pueden ser clasificados en la clase barbecho, así como carreteras que pueden pasar a ser identificadas como tejido de infraestructura urbana. En el caso del agua, el territorio ocupado por esta se mantiene en un 63%, detectándose las principales evoluciones de la clase hacía monte y residencial con un 13 y 18% respectivamente. La explicación encontrada para la evolución de la clase Agua, radica en la posibilidad de la aparición de verdín sobre las balsas, que permita que parte de las balsas se clasifiquen como Monte. El cambio a la clase Residencial corresponde al vaciado de las mismas, apareciendo una superficie no cubierta de agua que se clasifica como tal.

2. Análisis de las clases barbecho y secano. Entre ambas clases se clasifica más del 50% de la extensión del área estudiada, por lo que se tratan de dos clases muy representativas. Se analizan conjuntamente puesto que ambas constituyen en porcentaje de cambio, la primera clase a la que varían los píxeles que las componen. Particularmente extraordinario por extensión del cambio producido, es el cambio de barbecho a secano (34% y 10781ha). Este cambio, puede deberse al aumento de la vegetación en las parcelas, ya sea por ser las primeras etapas de una plantación hortícola como por la llegada de la estación de mayor humedad, que permite el desarrollo vegetal en mayor intensidad. Por su parte, la clase Secano se mantiene bastante constante permaneciendo el 70% de su extensión inalterada, produciéndose algunos cambios a Huerta y Barbecho (8% ambos).

3. Análisis agrío regadío y huerta. Se trata de las clases en las que sus cambios se producen con una mayor fiabilidad, por lo que sus resultados se esperan los más acertados. Ambas clases se muestran relativamente inalteradas de octubre a noviembre manteniendo el 84 y 69% de su extensión inicial. El

principal cambio identificado para los píxeles clasificados inicialmente como Agrío Regadío se produce hacia la clase seco y huerta, con una variación del 5 y 4% respectivamente. La clase huerta, presenta los mayores cambios hacia las clases seco y cítricos, con un 8 y 9% de cambio. Con una comprobación visual de los cambios detectados, se ha identificado que los cambios producidos en la clase huerta, se deben a las diferentes fases del cultivo. De esta manera, cuando el cultivo se encuentra en las primeras fases de desarrollo en las que predomina la tierra labrada, puede ser clasificado como seco, al ser esta representativa de suelos con reducida vegetación.

4. Análisis residencial, monte e invernadero. Las tres clases presentan un porcentaje de cambio similar, alrededor del 30%. Los principales cambios, se producen con la clase seco para el caso de las clases definidas como residencial y monte, mientras que, para Invernadero, el mayor cambio se produce con Invernadero.

La diferencia temporal entre las imágenes sobre las que se ha realizado la detección de cambios es mensual, identificándose sobre el porcentaje de una misma clase, variaciones significativas en clases que teóricamente deben mantenerse prácticamente constantes a lo largo de un mes. Este hecho puede achacarse a la fiabilidad del 66% obtenida para la detección del cambio, aunque se pueden encontrar otros factores influyentes. En primer lugar, se ha definido como cambio a cualquier variación en la clasificación de un píxel en imágenes de fechas distintas. Sin embargo, si se realiza un análisis del cambio excluyendo aquellas superficies que presentan cambios menores a 10 píxeles contiguos o 1000m², se observa que la variabilidad de la imagen disminuye. Los resultados del estudio se muestran en la Tabla 42.

Tabla 42. Evaluación del cambio en superficies mayores a 10 píxeles contiguos.

	Porcentaje del total	Superficie en hectáreas
Sin cambios	75,98%	72698,29
Con cambios	24,02%	22984,70
Total	100,00%	95682,98

Como se observa en la Tabla 42, al excluirse aquellas superficies con una superficie menor a los 1000m² o 10 píxeles contiguos, la superficie de estudio disminuye hasta las 95683 hectáreas, sobre la que se analiza el porcentaje de superficie sujeta al cambio. Al eliminarse dichas superficies del estudio, la variabilidad de la imagen se reduce. Este hecho significa, que un mayor porcentaje de cambios se produce en píxeles sueltos que en agrupaciones de píxeles, mostrando la posibilidad de emplear técnicas de segmentación sobre las imágenes y/o la definición de parcelas mediante catastro para homogeneizar los cambios y evitar identificar aquellos que se producen en píxeles sueltos.

Indirectamente, se puede extraer la importancia de definir la superficie mínima con la que determinar que es un cambio y que no lo es, y como la variabilidad aumenta en aquellos píxeles que se encuentran dispersos, manteniéndose con pocos cambios en las agrupaciones de mayor envergadura. Finalmente, se presenta la Tabla 43, en la que se muestra la matriz de cambios en porcentaje por clases, con la evaluación de aquellas superficies mayores a 10 píxeles contiguos.

Tabla 43. Matriz de cambios para la región de estudio, en porcentaje por clases.

		NOVIEMBRE 2017								
		AGUA	BARBECHO	CÍTRICOS	HUERTA	INDUSTRIA	INVERNADERO	MONTE	RESIDENCIAL	SECANO
OCTUBRE 2017	AGUA	79,90	0,61	0,04	2,67	0,69	0,00	12,18	3,69	0,22
	BARBECHO	0,10	53,19	0,26	8,79	0,75	0,42	1,42	3,10	31,98
	CÍTRICOS	0,00	0,14	93,24	1,50	0,00	0,33	0,71	0,84	3,24
	HUERTA	0,10	2,15	4,21	84,78	0,00	1,41	0,52	2,06	4,76
	INDUSTRIA	0,06	18,95	0,14	1,36	49,83	11,04	0,58	14,13	3,92
	INVERNADERO	0,02	1,46	0,03	1,83	1,81	89,81	0,31	3,73	1,00
	MONTE	0,28	1,25	0,60	2,13	0,09	0,18	86,83	3,05	5,58
	RESIDENCIAL	0,08	3,43	0,05	2,89	0,40	0,79	1,11	85,58	5,68
	SECANO	0,00	5,69	1,69	8,95	0,66	0,13	1,38	1,29	80,21

En la matriz diseñada, se puede observar cómo se reducen los cambios entre clases frente a la Tabla 41, siendo especialmente visible dicho efecto para la clase residencial, que aumenta su homogeneidad entre imágenes en un 20%.

7.2. RESULTADOS DE LA ELABORACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO DE TÉMEZ CON IMÁGENES SATÉLITE

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos al modelizar hidrológicamente la región de estudio con el modelo de Témez, mediante el empleo de los Sistemas de Información Geográfica y la obtención de los usos del suelo mediante clasificación de imágenes satélite. Entre los principales resultados obtenidos, destacan la caracterización hidrológica de la zona de estudio y la estimación de los valores de infiltración que se producen en zonas de cultivos, logrando de esta manera establecer la bases para realizar una estimación de infiltración de nitratos hacia el flujo subsuperficial. Además, se ofrece una comparativa de los resultados obtenidos mediante la metodología empleada (aplicación del modelo hidrológico celda a celda) y la evaluación de la misma cuenca con idénticos parámetros de entrada de una manera global.

Con el propósito de otorgar validez a los resultados obtenidos, se analizan estos con los que se presentan en el Libro Blanco del Agua de ámbito nacional, ya que en este proyecto se sigue el mismo modelo distribuido. Además, se ha obtenido la estimación de la infiltración sobre el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena, comparándose el valor obtenido con los valores presentados por diversos autores, en estudios de ámbito regional.

Finalmente, se analiza el modelo hidrológico de Témez frente a otro software de simulación hidráulica como es el *Soil & Water Assessment Tool (SWAT)*. Para ello, se introducen los mismos datos de entrada producidos por el generador de clima del SWAT en el modelo de Témez, identificándose las divergencias y similitudes entre los productos de ambos modelos.

7.2.1. Balance hídrico del suelo:

Para realizar la evaluación del balance hídrico del suelo, se presentan los valores de precipitación y evapotranspiración de referencia medios obtenidos durante el periodo 1998-2018 por las estaciones del SIAM IMIDA para la región de estudio. Además, se adjuntan los valores de riego asignados mediante la metodología descrita en el Capítulo 6. Los valores que se presentan en la Tabla 44, se han obtenido a partir del análisis de los histogramas de los rásters creados, permitiendo realizar un pequeño análisis previo de las características hidrológicas de la región de estudio antes de exponer los resultados obtenidos por el modelo.

Tabla 44. Valores medios de precipitación, regadío y evapotranspiración, obtenidos en la zona de estudio expresados en mm/m². Elaboración propia.

Mes	Precipitación	Riego	Evapotranspiración
Octubre	28,21	11,10	80,02
Noviembre	38,20	9,09	51,72
Diciembre	34,89	8,52	39,56
Enero	30,40	9,73	47,64
Febrero	14,31	9,71	60,52
Marzo	27,90	18,57	91,85
Abril	22,84	19,62	116,07
Mayo	14,14	23,02	149,46
Junio	7,13	22,82	173,31
Julio	1,60	26,06	183,32
Agosto	9,03	16,78	162,04
Septiembre	39,71	12,84	117,08
TOTALES	268,36	187,86	1272,59

En un primer análisis, se observa que la media de precipitación en un año hidrológico es de 268,36 mm/m² frente a los 1272,52mm/m² de evapotranspiración de referencia registrados. Los anteriores valores indican que la precipitación anual únicamente representa el 21% de la evapotranspiración de referencia, no existiendo mes alguno en que las precipitaciones sean superiores a la evapotranspiración de referencia. Si se contabiliza la asignación de regadío realizada, el porcentaje aumenta hasta el 36%, registrándose en el mes de diciembre unos mayores aportes que evapotranspiraciones. En definitiva, los valores indican inicialmente que la zona de estudio se encuentra sometida a un elevado déficit hídrico, más acusado durante el período estival.

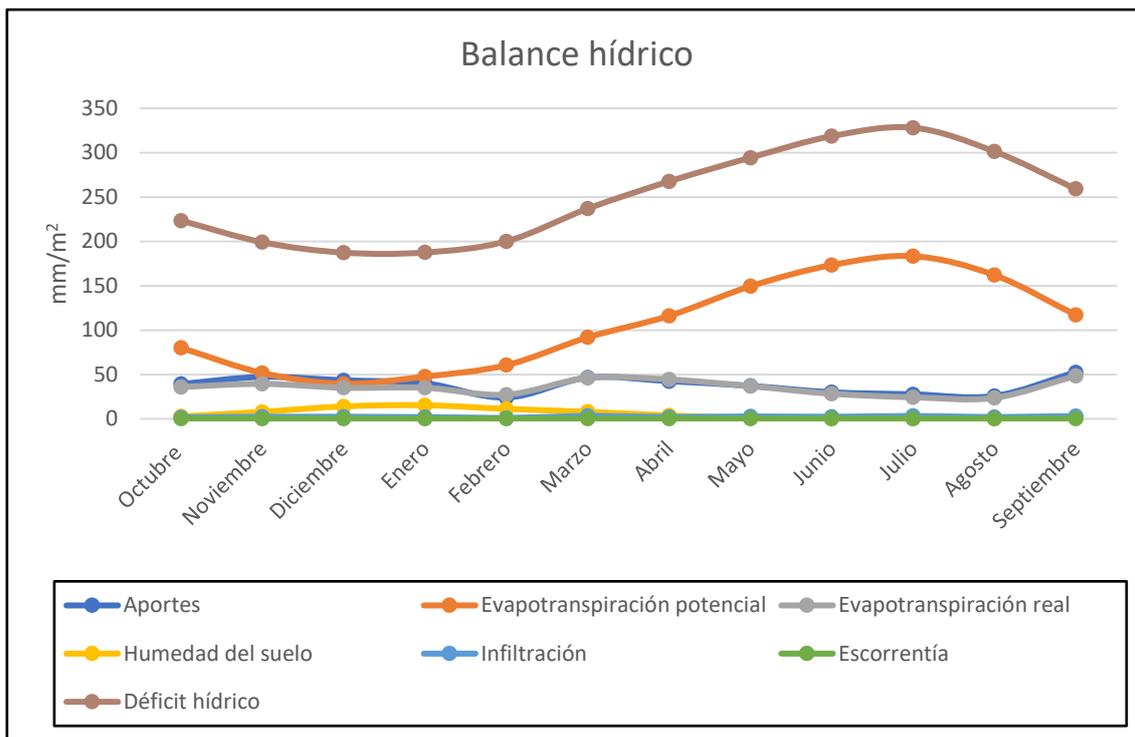
Con la realización de esta primera evaluación, se presenta la Tabla 45, en la que se muestran los principales parámetros obtenidos mediante la simulación realizada que permiten estimar el balance hídrico del suelo.

Tabla 45. Resultados del modelo hidrológico de Témex expresados en mm/m². Elaboración propia.

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.
Aportes	39,31	47,29	43,41	40,13	24,02	46,47	42,46	37,16	29,95	27,66	25,81	52,55
Evapotranspiración de referencia	80,02	51,72	39,56	47,64	60,52	91,85	116,07	149,46	173,31	183,32	162,04	117,08
Evapotranspiración real	35,91	39,43	35,02	35,01	27,23	46,21	44,43	36,84	28,26	24,32	23,69	48,52
Humedad del suelo	2,61	7,92	13,99	15,32	11,19	7,97	3,75	1,10	0,27	0,05	0,03	0,79
Infiltración	1,53	2,48	2,24	1,91	0,90	3,26	2,15	2,76	2,34	3,27	1,99	3,09
Escorrentía	0,06	0,09	0,08	0,07	0,03	0,22	0,11	0,22	0,20	0,30	0,15	0,17
Déficit hídrico	223,44	199,07	187,31	187,53	200,08	236,96	267,62	294,37	318,59	328,14	301,33	259,12

Mediante el análisis de la Tabla 45, se observa que los meses en los que se registran menores aportes (precipitación + regadío) sobre la cuenca vertiente al Mar Menor son los que registran una mayor evapotranspiración de referencia, con lo que el déficit registrado es mayor y la humedad en el suelo es prácticamente nula. La mayor reserva de humedad en el suelo se registra en los meses de diciembre, enero y febrero, coincidiendo en el periodo de mayores precipitaciones. Otro indicador que muestra el déficit presente, es la evapotranspiración real. Esta no alcanza en ningún mes el valor de la evapotranspiración de referencia, lo que indica que en el global de la cuenca las aportaciones no son suficientes para lograr un desarrollo de la vegetación sin limitaciones hídricas.

En cuanto a los valores de escorrentía obtenidos, estos son prácticamente nulos a lo largo de toda la simulación. Este hecho se debe al carácter de las precipitaciones en la cuenca de estudio, ya que estas se concentran en unos pocos días anualmente y al ser el modelo empleado de frecuencia mensual la precipitación que se produce en un corto espacio temporal se distribuye a lo largo del mes, caracterizándose como una pequeña aportación diaria a lo largo de este. Para mejorar la comprensión de los resultados obtenidos, se presenta la Gráfica 9.



Gráfica 9. Balance hídrico de la región de estudio. Elaboración propia.

7.2.2. Detección de las zonas en las que se produce infiltración:

Una de las ventajas que se obtiene al aplicar un modelo hidrológico sobre imágenes clasificadas de elevada resolución espacial, es que cada píxel analizado se puede comportar como una unidad de respuesta hidrológica (HRU), ya que en él se pueden definir unos parámetros de entrada (infiltración, aportación, pendiente... etc.), que pueden diferir totalmente de los píxeles vecinos. La principal ventaja de este método, es que se evita la generalización de los resultados, con la consiguiente pérdida de información, obteniendo en consecuencia unos resultados de mayor precisión.

De esta manera, se ha logrado aplicar un factor de regadío únicamente sobre aquellas zonas en las que existen cultivos, caracterizando la infiltración anual que se producen en estas. La Imagen 39, correspondiente a los resultados de infiltración obtenidos para el mes de febrero, muestra como la infiltración se produce de una manera desigual a lo largo de la zona de estudio, adquiriendo valores más elevados (representados en color verde) en aquellas zonas donde existen cultivos de regadío, frente al resto del territorio, dónde los valores de infiltración son próximos a cero (colores rojizos).

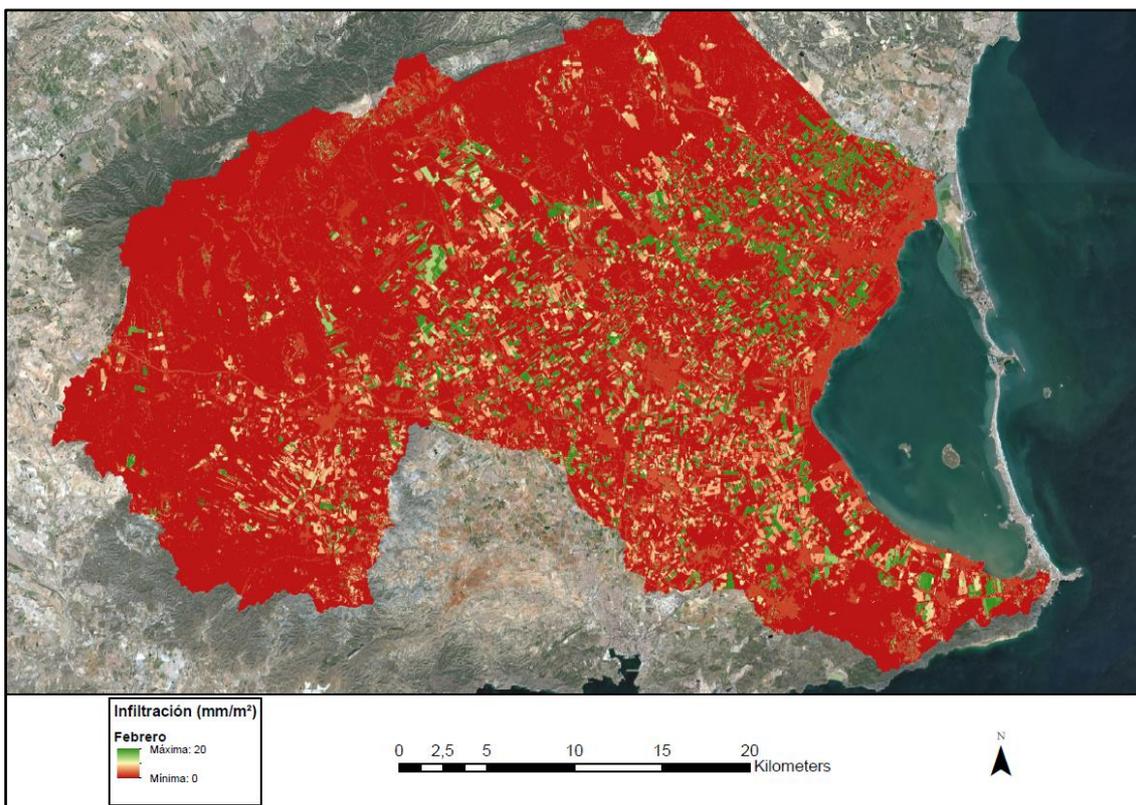


Imagen 39. Valores de infiltración obtenidos para el mes de febrero. Elaboración propia.

Con la detección de los diferentes cultivos y la simulación de la infiltración que en ellos sucede, surge la posibilidad de desarrollar estudios posteriores relacionados con el tránsito de nitratos hacia el flujo subsuperficial. La infiltración detectada en la zona de estudio se muestra en el Anejo IV.

7.2.3. Comparativa de resultados al modelizar una cuenca con resoluciones espaciales diferentes:

En este apartado se pretende poner en relieve la varianza en los resultados obtenidos en simulaciones hidrológicas al realizar simplificaciones sobre las cuencas. Para ello, se han comparado los resultados obtenidos con la simulación del modelo hidrológico de Témez aplicado sobre la cuenca de estudio en celdas unitarias de 10x10 metros de resolución, frente a una simulación de la misma cuenca con los mismos valores de entrada y mismo modelo, pero evaluando unitariamente el total de la cuenca.

Con las anteriores premisas, se muestra la Tabla 46, correspondiente a los valores de entrada adoptados por ambos modelos. La Tabla 47, dónde se muestran los resultados de la simulación realizada sobre celdas de 10x10metros de resolución y la Tabla 48, dónde los resultados ofrecidos se obtienen a partir de una evaluación unitaria de la cuenca mediante hoja de cálculo.

Tabla 46. Valores de entrada para la simulación hidrológica de la cuenca de estudio. Elaboración propia.

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.
Precipitación	28,21	38,20	34,89	30,40	14,31	27,90	22,84	14,14	7,13	1,60	9,03	39,71
Riego	11,10	9,09	8,52	9,73	9,71	18,57	19,62	23,02	22,82	26,06	16,78	12,84
Aporte	39,31	47,29	43,41	40,13	24,02	46,47	42,46	37,16	29,95	27,66	25,81	52,55
Evapotranspiración potencial	80,02	51,72	39,56	47,64	60,52	91,85	116,07	149,46	173,31	183,32	162,04	117,08
Reserva de humedad máxima	144,25	149,97	155,67	153,90	154,89	156,30	159,55	148,70	146,42	145,12	139,39	142,11

Tabla 47. Balance hídrico del suelo con una resolución de 10x10 metros. Elaboración propia.

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.
Evapotranspiración real	35,91	39,43	35,02	35,01	27,23	46,21	44,43	36,84	28,26	24,32	23,69	48,52
Humedad del suelo	2,61	7,92	13,99	15,32	11,19	7,97	3,75	1,10	0,27	0,05	0,03	0,79
Infiltración	1,53	2,48	2,24	1,91	0,90	3,26	2,15	2,76	2,34	3,27	1,99	3,09
Escorrentía	0,06	0,09	0,08	0,07	0,03	0,22	0,11	0,22	0,20	0,30	0,15	0,17
Déficit hídrico	223,44	199,07	187,31	187,5	200,08	237	267,62	294,37	318,59	328,14	301,33	259,12

Tabla 48. Balance hídrico del suelo al realizar la simulación hidrológica de la cuenca de una forma global simplificada. Elaboración propia.

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	My.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.
Evapotranspiración real	39,31	47,25	39,56	43,98	24,02	46,46	42,46	37,16	29,95	27,66	25,81	52,30
Humedad del suelo	0,00	0,00	3,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Infiltración	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
Escorrentía	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Déficit hídrico	229,71	201,41	189,25	193,48	210,21	241,54	265,76	299,15	323,00	333,01	311,73	266,77

Al realizar una comparativa entre los resultados de las simulaciones hidrológicas, se observa que estos divergen al realizar una simplificación de la cuenca, aunque los datos de entrada son coincidentes. La Tabla 48, presenta valores de humedad del suelo, infiltración y escorrentía prácticamente nulos, inferiores a los que se presentan en la Tabla 47. Sin embargo, los valores de evapotranspiración real y de déficit hídrico son superiores.

Este hecho se debe a que la simulación realizada con una menor simplificación permite evaluar con un mayor grado de acierto la variabilidad de presenta el territorio y así, mientras que una parcela se encuentra sujeta a regadío, el campo circundante puede no encontrarse, siendo capaz de asignar una dotación en concreto a dicha parcela. El hecho de generalizar, permite realizar la simulación hidrológica con una mayor rapidez y facilidad, a cambio de homogeneizar los resultados. En el caso del ejemplo propuesto, la dotación de regadío asignada para una parcela, se reparte en la totalidad del territorio. Esto incide en los valores obtenidos, de manera que la infiltración se reduce debido la menor intensidad de las aportaciones.

7.2.4. Estimación de la recarga del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena (Validación de resultados hidrológicos):

Habitualmente, una de las últimas fases en las simulaciones hidrológicas es la validación y ajuste de los resultados. Este apartado se suele realizar mediante la comparativa entre los resultados simulados y los obtenidos mediante estaciones de aforo, calculando a partir de estos datos valores estadísticos representativos del grado de concordancia alcanzado.

Sin embargo, en la cuenca de estudio, no se disponen de estaciones de aforo, por lo que el método anteriormente descrito no puede ser empleado en la cuenca. Por este motivo, para la validación de los resultados obtenidos, se ha recurrido a la revisión de trabajos hidrológicos anteriores sobre la misma cuenca de estudio, con los que se han comparado los resultados obtenidos en el presente proyecto.

Así con la revisión del Libro Blanco del Agua, los valores extraídos para los principales indicadores hidrológicos sobre la zona de estudio son los siguientes:

- Evapotranspiración real: Entre 200 y 300 mm/m² anuales.
- Relación entre la evapotranspiración real y evapotranspiración potencial: Entre el 20 y el 40% anual.
- Recarga del acuífero cuaternario: Entre 0 y 50 mm/m² anuales.

Los resultados obtenidos en este proyecto se encuentran en los intervalos ofrecidos en el Libro Blanco del Agua, estimando la evapotranspiración real anual en $424\text{mm}/\text{m}^2$ en caso de simular aportaciones de regadío y $237\text{mm}/\text{m}^2$ sin simular la aportación realizada sobre regadíos. La relación entre la evapotranspiración real y la evapotranspiración de referencia se sitúa en el 33% anual y finalmente la infiltración hacia el acuífero cuaternario se estima en $28\text{mm}/\text{m}^2$ anuales. Por lo tanto, los valores obtenidos en el presente trabajo se encuentran dentro de los rangos establecidos en el Libro Blanco del Agua, por lo que se puede deducir que los resultados obtenidos se acercan a los valores estimados previamente y pueden resultar acertados.

Finalmente, a partir de la extensión del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena ($116229,14\text{ ha}$) determinada a partir de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) y el valor de infiltración anual igual a $28\text{ mm}/\text{m}^2$ sobre la cuenca de estudio, se estima la infiltración anual que se produce sobre el acuífero en hectómetros cúbicos. La estimación realizada, obtiene un valor de $32,45\text{ hm}^3$ anuales de aportación al acuífero. Este valor es inferior a las estimaciones realizadas en 1991 por el Instituto Geológico y Minero Español (IGME) que cuantifica las entradas en 50hm^3 anuales. Otros estudios, como el plan de cuenca, realizado por la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) en 2015, elevan el valor de infiltración a 94hm^3 anuales. Finalmente, otros estudios relacionados señalan que la infiltración producida en el acuífero es de 114hm^3 .

Una posible conclusión al analizar dichos valores, radica en la gran dispersión que los resultados a día de hoy presentan, mostrando la dificultad de evaluar correctamente los recursos hídricos y de realizar simulaciones hidrológicas que concuerden exactamente con los valores reales.

7.2.5. Comparación con el modelo hidrológico SWAT:

En este apartado se realiza una breve comparativa entre los resultados que se obtienen con un modelo con un número de variables reducidas como es el de Témez frente a un software como SWAT, desarrollado para la simulación hidráulica de cuencas con el que se puede determinar la calidad de las aguas y el impacto del cambio climático.

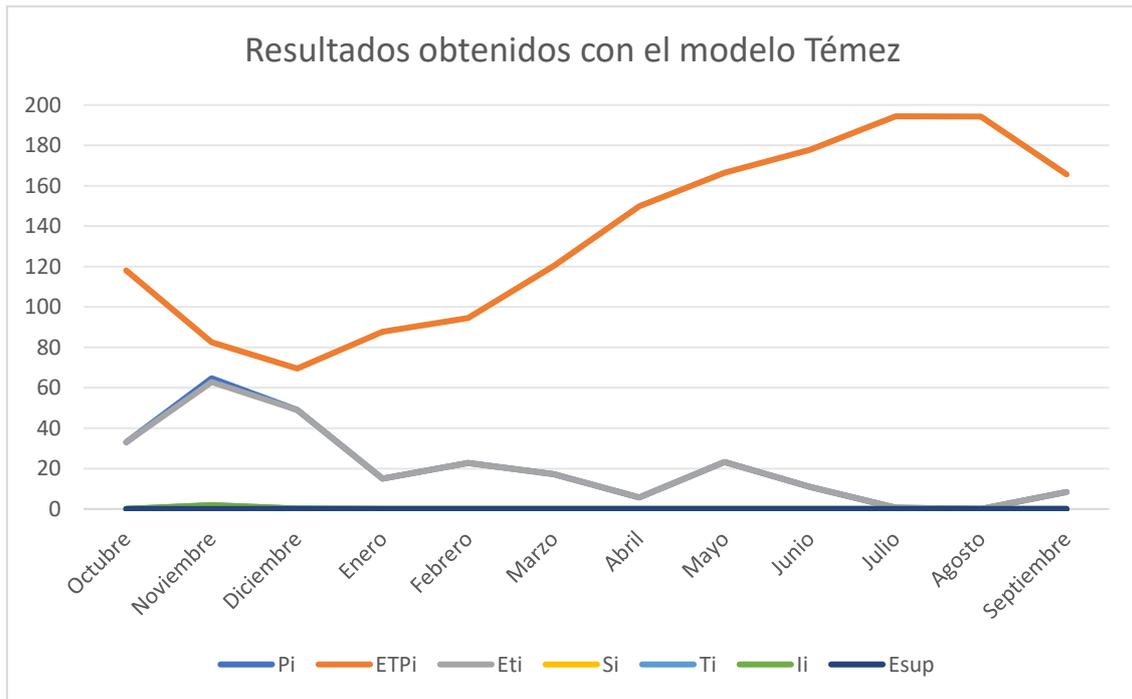
Para la comparativa entre ambos modelos, se han empleado los datos de precipitación (P_i) y de evapotranspiración de referencia (ETP_i), obtenidos a partir del generador del clima de SWAT en una serie climática de 25 años. Seguidamente, los anteriores valores se han introducido en un modelo tipo Témez y se ha calculado la evapotranspiración real (ET_i), la humedad del suelo (S_i), el excedente (T_i), la infiltración (I_i) y la escorrentía superficial (E_{sup}). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 49, expresados todos ellos en mm/m^2 .

Tabla 49. Balance hídrico obtenido a partir del modelo de Témez con los datos de entrada proporcionados por el simulador climático de SWAT. Elaboración propia.

	P_i	ETP_i	ET_i	S_i	T_i	I_i	E_{sup}
OCT.	33,02	118,10	33,02	0,00	0,00	0,00	0,00
NOV.	64,72	82,57	62,83	0,00	1,89	1,89	0,01
DIC.	49,04	69,54	48,94	0,00	0,10	0,10	0,00
ENE.	14,99	87,72	14,99	0,00	0,00	0,00	0,00
FEB.	22,78	94,54	22,78	0,00	0,00	0,00	0,00
MAR.	17,28	120,37	17,28	0,00	0,00	0,00	0,00
ABR.	5,64	149,85	5,64	0,00	0,00	0,00	0,00
MY.	23,21	166,44	23,21	0,00	0,00	0,00	0,00
JUN.	10,89	177,91	10,89	0,00	0,00	0,00	0,00
JUL.	0,72	194,40	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00
AG.	0,00	194,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SEP.	8,34	165,63	8,34	0,00	0,00	0,00	0,00

Con el modelo de Témez de paso temporal mensual, se puede observar que la evapotranspiración real es prácticamente igual a la precipitación, lo que indica que se producen pocos o nulos excedentes. Además, la evapotranspiración potencial es superior a la precipitación en todos los meses del año hidrológico,

lo que provoca que no se puedan generar reservas de humedad en el suelo y, por tanto, se dificulta que se puedan generar infiltración u escorrentía superficial con una evaluación temporal de escala mensual. Para mejorar la comprensión de los datos, se presenta el Gráfico 10, que muestra la evolución del balance hídrico de manera gráfica.



Gráfica 10. Balance hídrico de la zona de estudio con los datos del modelo climático de SWAT. Elaboración propia.

Finalmente, se ha realizado una simulación de la cuenca de estudio mediante el software SWAT, de las que se han extraído los valores de precipitación y evapotranspiración de referencia empleados para la comparativa con el modelo de Témez. En el apartado hidrológico, las variables que se obtienen con la modelación con SWAT son las mismas que las obtenidas con el modelo de Témez, además de la escorrentía lateral. Los valores que se han obtenido son los mostrados en la Tabla 50.

Tabla 50. Output del software SWAT para el área de estudio. Elaboración propia.

	P_i	ETP_i	ET_i	S_i	E_{SUPI}	$E_{LAT.}$	I_i	$E_{SUB.}$
OCT.	33,02	118,10	27,29	19,92	1,16	1,85	0,00	0,00
NOV.	64,72	82,57	28,54	49,99	2,37	3,29	0,00	0,00
DIC.	49,04	69,54	39,86	54,33	1,76	3,14	0,27	0,00
ENE.	14,99	87,72	23,42	42,99	1,62	1,37	0,14	0,00
FEB.	22,78	94,54	22,35	41,34	0,82	1,25	0,00	0,00
MAR.	17,28	120,37	21,61	35,70	0,66	0,65	0,00	0,00
ABR.	5,64	149,85	26,96	13,98	0,16	0,24	0,00	0,00
MY.	23,21	166,44	27,97	7,75	0,76	0,71	0,00	0,00
JUN.	10,89	177,91	16,46	1,35	0,39	0,47	0,00	0,00
JUL.	0,72	194,40	2,01	0,05	0,01	0,05	0,00	0,00
AG.	0,00	194,31	0,05	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
SEP.	8,34	165,63	7,43	0,17	0,34	0,39	0,00	0,00

A grandes rasgos, se observa que el comportamiento hidrológico es similar al calculado mediante un modelo tipo Témez. La evapotranspiración de referencia (ETP_i) es superior en todos los meses a los aportes realizados por las precipitaciones (P_i), imposibilitando de esta forma que exista una percolación significativa. Sin embargo, si se identifica que la humedad del suelo (S_i) es notablemente superior a la obtenida con el modelo de Témez y debido al carácter de las precipitaciones, se obtienen valores de escorrentía superficial y escorrentía lateral (E_{SUPI} y $E_{LAT.}$), alcanzándose los valores máximos para los meses de noviembre y diciembre.

Una de las causas que provocan la divergencia de los resultados, es el paso temporal que tienen ambos modelos. Mientras que el modelo de Témez empleado es de paso mensual, el modelo hidrológico de SWAT evalúa la cuenca de manera diaria. Este hecho, puede resultar indiferente para aquellas regiones en las que las precipitaciones se reparten homogéneamente a lo largo del año, pero, en aquellas zonas en las que las precipitaciones son escasas y estas se concentran puntualmente en determinados días al año, el paso temporal elegido resulta muy importante, ya que un paso mensual puede homogeneizar los valores y no caracterizar correctamente la varianza.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

Para la elaboración del presente proyecto, se han adquirido conocimientos de la estructura agraria del Campo de Cartagena, a través de la revisión bibliográfica que ha permitido determinar la proporción de los cultivos, fechas de plantación y recolección, así como marcos de plantación más habituales que se dan en la actualidad, observándose además las técnicas para la optimización de recursos hídricos que se dan en la actualidad. Todo ello ha permitido simular la dotación hídrica que se realizan en dichos cultivos e incorporarla en el modelo hidrológico en forma de aportes.

La localización de dichos cultivos a lo largo del periodo de estudio se ha realizado mediante la teledetección. La obtención de imágenes satélites y su posterior clasificación, ha sido precedida por una revisión bibliográfica extensa, en la que se han evaluado las diferentes metodologías disponibles en la actualidad en cuanto a la modalidad de clasificación realizada (supervisada o no supervisada) y los diferentes clasificadores existentes. La clasificación de las imágenes ha conllevado la necesidad de evaluar los resultados obtenidos, por lo que se han empleado los indicadores estadísticos más extendidos en el campo de la clasificación de imágenes.

La definición de los usos del suelo mediante la teledetección se establece como una fuente de información para el estudio hidrológico de cuencas mediante modelos de simulación hidrológica. La elección del modelo deviene de la revisión bibliográfica realizada, identificándose los motivos en el apartado dedicado a la justificación del modelo. Con la selección del modelo de Témez, se ha ganado en comprensión y funcionamiento del mismo, identificando y coleccionando la información de entrada requerida y las ecuaciones que rigen el modelo. Estos parámetros se han adaptado para la región de estudio transformándolos a lenguaje computacional para la aplicación del modelo mediante los SIG.

Los resultados obtenidos a partir de la modelización hidrogeológica para la zona de estudio, se han analizado con los ofrecidos por estudios precedentes realizados por diferentes autores, advirtiéndose una elevada dispersión de los valores ofrecidos por cada uno de ellos, que puede ser indicativo de la dificultad de realizar una caracterización acertada de la zona. A pesar de la dispersión detectada, los resultados obtenidos se muestran coherentes dentro del rango identificado.

Con todo ello, se ha logrado monitorizar y clasificar los usos del suelo del entorno del Campo de Cartagena durante el periodo de estudio mediante el empleo de la teledetección conforme a las necesidades del modelo hidrológico. Se ha implementado mediante los SIG un modelo hidrológico tipo Témez, con el que se ha modelizado la infiltración que se produce en una zona en la que existen aprovechamientos agrícolas intensivos a lo largo de un año hidrológico, lográndose alcanzar los diferentes objetivos propuestos, tanto generales como específicos.

La combinación de la teledetección, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los modelos hidrológicos presenta grandes ventajas. En primer lugar, con la obtención gratuita y clasificación de imágenes satélite, se pueden caracterizar los usos del suelo de acuerdo a las necesidades particulares de los modelos hidrológicos que se planteen. En este proyecto en concreto, la teledetección y el posterior tratamiento y clasificación de las imágenes, ha permitido identificar aquellas zonas del entorno del Campo de Cartagena en las que se realizan cultivos de regadío, localizando mensualmente las parcelas que se encuentran cultivadas, permitiendo simular mediante el modelo hidrológico planteado los regadíos que en ellas se realizan.

Además de su aplicación hidrológica, la clasificación de los usos del suelo realizada, permite obtener una serie de resultados adicionales, como es la elaboración de un inventario de los usos del suelo de la zona y la evolución de los mismos a lo largo del periodo de estudio. Respecto a la detección del cambio, se ha identificado que estos se producen en una mayor proporción en aquellos píxeles que no se encuentran agrupados que en aquellos presentes en grandes agrupaciones. Además, la clasificación de los usos del suelo ha permitido

identificar posibles problemáticas ambientales, como es la caracterización de la extensión de cubierta plástica en el Campo de Cartagena debido a la siembra de melones y sandías, que en caso de no ser biodegradable o retirada una vez finalizado el cultivo puede producir un impacto en el entorno; la presencia de cultivos de regadío en zonas definidas como no regables, así como la identificación de posibles balsas de riego no legales.

La validación de los resultados obtenidos mediante la clasificación de las imágenes se ha realizado a través de la elaboración de matrices de confusión obteniéndose una fiabilidad global del 82% y un valor kappa del 80%.

En materia hidrológica, cartografiar, delimitar y asignar las diferentes variables que componen un modelo de manera personal sobre la cuenca a evaluar, ofrece al usuario la oportunidad de familiarizarse con dicha cuenca de manera previa a la ejecución del modelo planteado, permitiendo que este se cerciore de los valores de entrada asignados, lo que puede resultar en una mejora de la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Se ha decidido emplear el modelo de Témez frente a otros posibles modelos hidrológicos dado que este resulta adecuado para simular el comportamiento hidrológico de una cuenca, ratificado su empleo en numerosos estudios previos. Adicionalmente, el número de ecuaciones que rigen el modelo es limitado, lo que facilita su integración en los sistemas de información geográfica. Finalmente, uno de los principales problemas que atañen en general a los modelos hidrológicos es el número de variables de entrada que se requieren y la dificultad en obtener dicha información. El modelo de Témez sortea dicho inconveniente con número de variables de entrada limitado, lo que permite disponer de estas con mayor facilidad.

Con el uso de los SIG, se ha logrado automatizar parcialmente el modelo hidrológico planteado, permitiendo obtener los resultados hidrológicos de la cuenca de estudio con una mayor rapidez y veracidad que si la ejecución del modelo se hubiese realizado manualmente.

De los resultados obtenidos por la ejecución del modelo de Témez con la combinación de los sistemas de información geográfica y la teledetección, destaca la simulación de la infiltración producida en aquellas zonas en las que

se detectan cultivos de regadío, logrando identificar la tipología del cultivo dependiendo de la época del año. A partir de la infiltración y la determinación de los cultivos obtenida, este estudio puede servir de referente a próximos en los que se caracterice el tránsito de nitratos hacia el flujo subsuperficial.

El modelo hidrológico ha permitido simular el balance del suelo de la cuenca vertiente al Mar Menor a lo largo de un año hidrológico y estimar las aportaciones producidas sobre el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena. A modo de validación de los resultados, se ha realizado una comparativa entre los valores de infiltración para el acuífero propuestos en el presente proyecto y los obtenidos en diferentes estudios, determinando que existe una elevada dispersión entre el conjunto de estudios evaluados y que los valores obtenidos en este estudio se encuentran dentro del rango que los estudios ofrecen.

Adicionalmente, se han expuesto las bondades y debilidades de la metodología empleada. Entre las principales fortalezas detectadas, destaca la resolución espacial que ofrece la teledetección. Al poder definir la cuenca de estudio con una resolución de 10x10 metros, la variabilidad que esta presenta puede ser fácilmente detectada, con la influencia que esta ejerce sobre los resultados obtenidos. Otra fortaleza del modelo es la caracterización de la zona de estudio mediante valores definidos por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), los cuales han sido ampliamente utilizados y validados previamente. La debilidad detectada, es referente a la resolución temporal empleada. Al tratarse de una cuenca en la que las precipitaciones se concentran en unos reducidos espacios temporales, una resolución temporal de un mes hace que la precipitación se reparta homogéneamente a lo largo del mes, sin lograr caracterizar completamente la variabilidad que estas presentan. Dicho efecto puede no ser relevante en aquellas cuencas en las que las precipitaciones se distribuyen homogéneamente a lo largo de un mes.

Finalmente, para alcanzar los objetivos que se han propuesto, se han descargado y empleado imágenes del satélite Sentinel-2, siendo estas empleadas en la actualidad para la determinación de los usos del suelo en los programas Corine Land Cover y SIOSE. Para realizar las correcciones, se ha empleado el software Sentinel Application Platform (SNAP), desarrollado por la

Agencia Espacial Europea (ESA) dentro del marco de observación terrestre Copernicus.

Para la clasificación de las imágenes obtenidas, se han empleado los programas ArcGIS y SNAP. Durante el proceso de clasificación, se ha recurrido a ortofotos de elevada resolución del programa PNOA, a sistemas de clasificación de usos del suelo (Corine Land Cover y SIOSE), así como a los datos catastrales ofrecidos por la administración. Todo ello empleado para definir las regiones de entrenamiento y evaluar la bondad de la clasificación obtenida.

Se ha analizado el modelo hidrológico de Témex, y se han obtenido el resto de variables que el modelo requiere. Los datos meteorológicos, se han adquirido a partir de los registros de las estaciones meteorológicas que el Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA) tiene distribuidas en el entorno del Campo de Cartagena, empleando únicamente aquellas estaciones con un historial de 20 años de registros. En este apartado, se han identificado y cuantificado las necesidades hídricas mensuales de los diferentes cultivos existentes, con los datos que ofrece el Sistema de Información Agraria (SIAM) de la región de Murcia.

Estando en disposición de la totalidad de los datos requeridos para un modelo Témex, se ha desarrollado e implementado el modelo hidrológico mediante un sistema de información geográfica (SIG), que ha permitido simular hidrológicamente la cuenca vertiente al Mar Menor, así como determinar los valores de infiltración que se producen en la región, identificando aquellos puntos en los que se pueden producir aportes de nitratos debidos a la agricultura.

Los resultados obtenidos en el presente proyecto pueden devenir en futuras líneas de investigación. Por una parte, la teledetección ha mostrado su aptitud para la detección de problemáticas ambientales y de ordenación del territorio, pudiendo determinarse en futuros estudios los cultivos de regadío que se encuentran fuera de los límites de las zonas regables, la identificación de balsas de regadío no declaradas y la extensión de recubrimiento plástico empleado en los cultivos de acolchados. Por otra parte, el modelo hidrológico ha permitido simular la infiltración en los cultivos de regadío, pudiendo derivar en futuros estudios de transferencia de nitratos hacia el flujo subsuperficial.

CAPÍTULO 9

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of hydrology*, 87(1-2), 45-59.
- Alban, S. (2015). Independent Report Highlights Esri as Leader in Global GIS Market.
- Aldalur, B., & Santamaría, M. (2002). Realce de imágenes: filtrado espacial. *Revista de teledetección*, 17, 31-42.
- Allen, R. G. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. 56). Food & Agriculture Org.
- Álvarez, J., Sánchez, A., & Quintas, L. (2005). SIMPA, a GRASS based tool for hydrological studies. *International journal of geoinformatics*, 1(1), 1-13.
- Andújar, M., Plana, V., López, R., Martínez, F., & López, A. (2005). Comportamiento de nuevas variedades de alcachofa procedentes de semilla en el Valle del Guadalentín. Comunidad de Murcia. Consejería de Agricultura y Agua.
- Arquiola, J. P., Solera, A. S., Álvarez, J. A., & Elvira, N. L. (2017). Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos.
- Belgiu, M., & Csillik, O. (2018). Sentinel-2 cropland mapping using pixel-based and object-based time-weighted dynamic time warping analysis. *Remote sensing of environment*, 204, 509-523. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.005>
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, (48), 55-66.
- Borrego, J. M. (2001). El cultivo de la alcachofa, nuevas tecnologías productivas.
- Burgos, V. H., & Salcedo, A. P. (2014). Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información. 2do. *Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos*.

Centro Nacional de Descargas, 2019. Hidrografía de la Demarcación Hidrográfica del Segura.

Chuvieco Salinero, E. (2006). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel.

Chuvieco Salinero, E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial*. 3ed. Rialp 568p

Civera Matamoros, J. A. (2016). Análisis de ensayos de adaptación y potencial del brócoli AX 8011 en las zonas productoras de Murcia.

Conde, M. C., Perelman, S. B., & Cerezo, A. (2009). Efecto de diferentes métodos de clasificación de imágenes satelitales sobre índices de paisaje. *Revista de Teledetección*, 32, 5-13.

Conesa Celdrán, Joaquín. (2017). *Caracterización del flujo de sedimentos y nutrientes en superficies cultivadas mediante un modelo hidrológico tipo SWAT a escala de cuenca con ayuda de herramientas SIG*.

Congalton, R. G. (1985). *A comparison of five sampling schemes used in assessing the accuracy of land cover/land use maps derived from remotely sensed data*.

de Andalucía, J. (2009). Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.

Decreto-Ley 1/2018, de 7 de febrero, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor. Boletín oficial de la región de Murcia, núm. 36 de 13 de febrero de 2018.

Decreto-Ley nº. 1/2017, de 4 de abril, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad en el entorno del Mar Menor. Boletín oficial de la Región de Murcia, núm. 80. jueves, 6 de abril de 2017.

del Segura, D. H. (2013). Caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. Ficha 070.052 Campo de Cartagena.

del Segura, D. H. (2014). Plan hidrológico de la Demarcación del Segura 2015-2021. Gobierno de España, Ministerio para la transición ecológica.

Dirección General de producciones y mercados agrarios. (2017). *“Estadística Agraria de Murcia 2015-2016”*. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería y Pesca.

Equipo Técnico Nacional SIOSE (2018). *“Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España”*. Gobierno de España, Ministerio de Fomento.

Estrela, T. (1992). Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. Centro de Estudios Hidrográficos y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX. 55 pp.

España. Orden de 10 de mayo de 2012, por la que se regulan las normas técnicas de producción integrada en el cultivo de la lechuga.

España. Orden de 10 de mayo de 2012, por la que se regulan las normas técnicas de producción integrada en el cultivo de melón y sandía.

España. Orden de 10 de mayo de 2012, por la que se regulan las normas técnicas de producción integrada en el cultivo de brócoli.

European Commission. (2014). Press Release: EP Adopts European earth observation programme Copernicus.

European Space Agency. (2016). New format Naming Convention for Sentinel-2 products generated after the 6th of December 2016.

European Space Agency. (2019). Sentinel-2 Technical Guide, Products and Algorithms.

Felicísimo, A. M. (1994). Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales. 122 P.

Fernández, M. D., Thompson, R. B., Bonachela, S., Gallardo, M., & Granados, M. R. (2012). Uso del agua de riego en los cultivos de invernadero. *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios (CEA)*, (3), 115-138.

Fernández-Delgado, M., Cernadas, E., Barro, S., & Amorim, D. (2014). Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems?. *The Journal of Machine Learning Research*, 15(1), 3133-3181.

García Aróstegui, J.L., Marín Arnaldos, F., Martínez Vicente, D., (2017). Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor. Hidrogeología. Pags 7-22.

García Lindón, A. 2014. Murcia, un modelo de uso eficiente del agua en la agricultura. 2nd Mediterranean Water Forum. Jornada Técnica: Uso eficiente del agua en la agricultura. Región de Murcia, Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente.

García, E. B. (2002). Bosques, campos y pastos: el potencial económico de la vegetación mediterránea. *SAGVNTVM Extra*, 5, 129-146.

Geiß, C., Pelizari, P. A., Blickensdörfer, L., & Taubenböck, H. (2019). Virtual Support Vector Machines with self-learning strategy for classification of multispectral remote sensing imagery. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 151, 42-58.

Gimenez Casalduero, M.F., Marcos Diego, C., Oliva Paterna, F.J., Pérez Ruzafa, A., Robledano Aymerich, F., Torralva Forero, M^a del Mar. (2017). Ecología Lagunar. Informe Integral sobre el estado ecológico del Mar Menor. Pags 23-60. Región de Murcia, Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente.

- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., & Franklin, J. (2005). The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction. *The Mathematical Intelligencer*, 27(2), 83-85.
- Hernández, M. C. G., Vicedo, P. V., & López, F. C. (2005). Necesidades hídricas para el cultivo de patata temprana en el Campo de Cartagena. In *XXXIII Seminario de Técnicos y Especialistas en Horticultura, Badajoz, 2003* (pp. 235-244). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Hudson, W.D. y Ramn, C. W. (1987). Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53.
- Instituto Geológico y Minero de España. Glosario de Términos Hidrogeológicos.
- Instituto Nacional de Estadística (2014). Contabilidad Regional de España 2013.
- Jiménez-Moreno, M. J., González-Guillen, M. D. J., Escalona-Maurice, M., Valdez-Lazalde, J. R., & Aguirre-Salado, C. A. (2011). Comparación de métodos espaciales para detectar cambios en el uso del suelo urbano. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(3), 389-406.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 159-174.
- López Martínez, R., Conesa, F. V., & Martínez García, R. M. (2002). *Balance de variedades de lechuga en el campo de Cartagena* (No. 635.52). Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- Mantero, P., Moser, G., & Serpico, S. B. (2005). Partially supervised classification of remote sensing images through SVM-based probability density estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(3), 559-570.
- Martínez Núñez, L., Moreno, J. V., Chazarra, A., Gallego Abaroa, T., Avello, E., & Botey, M. R. (2015). Mapas de riesgo: Heladas y horas de frío en la España peninsular (periodo 2002-2012).
- Martínez Paz, J. M., Martínez Fernández, J., & Esteve Selma, M. A. (2007). *Evaluación económica del tratamiento de drenajes agrícolas en el Mar Menor (SE España)* (No. 1102-2016-90977, pp. 211-232).
- Mather, P. M. (1989). Computer processing of remotely sensed images. *Journal of Geography in Higher Education*. Vol. 13, No. 1; p. 81-83.
- MENOR, E. E. D. M. Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor.
- Ministerio de Hacienda Y Función Pública. (2018). Guía de la Certificación Catastral Descriptiva y Gráfica.
- Monreal, T. E., Calvo-Rubio, F. C., & Lorenzo, F. E. (1999). La evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. *Ingeniería del agua*, 6(2), 125-138.

- Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 247-259.
- Murillo, J. M., & Navarro, J. A. (2011). Aplicación del modelo de Témez a la determinación de la aportación superficial y subterránea del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada para su implementación en un modelo de uso conjunto. *Boletín Geológico y Minero*, 122(3), 363-388.
- Olmos Giménez, P. (2012). Modelización distribuida del impacto del cambio climático en componentes del ciclo hidrológico a escala mensual.
- Ordóñez, J. L. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Manual formativo de ACTA*, (62), 17-31.
- Osuna, E., Freund, R., & Girosit, F. (1997, June). Training support vector machines: an application to face detection. In *Proceedings of IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 130-136). IEEE.
- Pérez Hernández, F., Martínez Vicente, D., Carmona Cabrera A,J., Barba Martínez, E., Portillo Muñoz, J,M., Mora Rufete, I., Corbalán Pellicer, J., (2016). Estadística Agraria de Murcia 2015-2016. Región de Murcia, Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería y Pesca.
- Peri, C. (2012). Descubrimiento de la radiación no térmica. ISSN 1669-7871.
- Potenciano de las Heras, Á., & Villaverde Valero, J. J. (2009). Implementación del modelo hidrológico de Témez para la evaluación de recursos hídricos con GRASS GIS: fase superficial y subterránea.
- Printer Ingeniería. (2013). Anejo nº5. Estudio hidrológico. Tanque de tormentas de la C/Bernal. San Javier (Murcia)
- Pusineri, G., Pedraza, R., & Lozeco, C. (2005). Uso de modelos digitales de elevación y de sistemas de información geográfica en la modelación hidrológica. *Primera Reunión de Usuarios de Sistemas de Información Geográfica y Procesadores Digitales, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina*.
- Rees, G. 2005. The Remote Sensing Data Book. Cambridge University Press, 262 pp
- Richter, R., Wang, X., Bachmann, M., & Schläpfer, D. (2011). Correction of cirrus effects in Sentinel-2 type of imagery. *International journal of remote sensing*, 32(10), 2931-2941.
- Sahuquillo Herraiz, A. (1993). Simulación de acuíferos en los modelos de gestión. Conceptos y Métodos para la planificación hidrológica (Ed. Andreu, J.). Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE. Barcelona. pp. 137-170.
- Schläpfer, D., Borel, C. C., & Keller, J. (1996). *Atmospheric pre-corrected differential absorption techniques to retrieve columnar water vapor: Application to AVIRIS 91/95 data* (No. LA-UR-96-0047; CONF-9603128-2). Los Alamos National Lab., NM (United States).

Sobrino, J.A., Raissouni, N., Kerr, Y., Olios, A., López-García, M.J., Belaid, A., El Kharraz, M. H., Cuenca, J., Dempere, L., (2000). Teledetección. Sobrino, J. A. (Ed.), Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia (ISBN 84-370-4220-8), Valencia (España).

Soria, C. B. (2015). Principales plagas y enfermedades en el cultivo de la alcachofa. *Agrícola vergel: Fruticultura, horticultura, floricultura*, 34(384), 200-205.

Tapia, F. O., & Mora, F. E. (2004). The Information Society: new horizons for science. In *19th International CODATA Conference*.

Témez, J. R. (1977). Modelo Matemático de transformación "precipitación- escorrentía". Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. ASINEL. Madrid. 39

Zhang, X. Q., Yang, L. P., & Yamaguchi, Y. (2010). Retrieval of aerosol optical depth over urban areas using Terra/MODIS data. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 38, 374-379.

REFERENCIAS ONLINE DISPONIBLES EN SEPTIEMBRE 2019:

https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/copy_of_Nomenclature.pdf

<https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/clc-2012-validation-report-1>

<http://www.siose.es/>

<https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/atmos.html>

<https://pnoa.ign.es/>

<https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels>

<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/data-management/composite-bands.htm>