



ESTUDIO SOBRE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DEL SUELO EN EL PLA DE SANT JORDI, MALLORCA, ISLAS BALEARES (2016 - 2017)

Coordinador del Proyecto

Pedro A. Robledo Ardila

Equipo de trabajo:

Luis Moreno Merino

Carolina Guardiola Albert

Carlos Baquedano Estévez

Carmen Serrano Hidalgo

Nuria Naranjo Fernández

Héctor Aguilera Alonso

José Luis Cantón Ávila

Esperanza Palmer Gómez

Almudena de la Rosa Román

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS..... | 2 |
| 1.1 Antecedentes | 2 |
| 1.2 Objetivos del trabajo | 7 |
| 2. ÁREA DE ESTUDIO..... | 9 |
| 2.1 Localización y características geográficas y climáticas del Pla de Sant Jordi | 9 |
| 2.2 Síntesis geológica, geomorfológica e hidrogeológica | 13 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 17 |
| 3.1 Método procedimental | 17 |
| 3.2 Cálculos | 19 |
| 3.3 Campañas de infiltración | 20 |
| 4. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 21 |
| 4.1 Consideraciones previas | 21 |
| 4.2 Zona Es Pla de Na Tesa | 23 |
| 4.3 Zona Coll d'en Rabassa – Son Ferriol..... | 26 |
| 4.4 Zona Carretera de Puntiró | 29 |
| 4.5 Zona Aeropuerto Son Sant Joan..... | 32 |
| 4.6 Zona Sant Jordi..... | 35 |
| 4.7 Zona El Arenal..... | 38 |
| 4.7 Zona general del Pla de Sant Jordi..... | 41 |
| 4.8 Análisis geoestadístico..... | 43 |
| 4.9 Mejora de la estimación de Kfs | 51 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 61 |
| 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 62 |
| ANEXO 1 FICHAS DE LOS ENSAYOS DE INFILTRACIÓN..... | 65 |
| ANEXO 2 MUESTRAS DE SUELO: ANÁLISIS FÍSICOS Y GRANULOMÉTRICOS..... | 66 |

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes

El Pla de Sant Jordi es una Masa de Agua Subterránea localizada en Mallorca, Islas Baleares. Se trata de un área muy antropizada, situada al este de la ciudad de Palma de Mallorca y ubicada sobre un antiguo humedal desecado, muy parcelada para el uso agrícola y con un gran número de urbanizaciones y viales diseminados por toda el área.

El área está delimitada por cuatro bordes: al norte la autovía de Palma-Manacor; al sur la autovía de Palma-Llucmajor y la zona urbana de El Arenal; al este cierra la cuenca en primer término el pequeño relieve donde se asienta la localidad de Sant Jordi, aunque son los relieves de Xorrigo los que limitan la cuenca, poniendo en contacto el Pla con la plataforma carbonatada de Llucmajor; y al oeste el aeropuerto, que actúa como barrera impermeable dividiendo el Pla en márgenes bien diferenciados: la zona que drena el Torrent Sa Siquia al este y la zona que drena el Torrent Gros al Oeste.

El Pla de Sant Jordi constituye, desde un punto de vista geológico, geomorfológico e hidrogeológico, una zona especialmente interesante por su acuífero detrítico libre, el cual ha sido explotado durante muchos años para abastecimiento agrícola y urbano.

El Pla fue hace varios siglos una albufera circundante al pequeño núcleo urbano de Sant Jordi. La existencia de esta albufera está recogida en los mapas de la época (figura 1) y en el análisis de las series estratigráficas holocenas. Se deduce que, en tiempos históricos, esta cuenca debió permanecer en un nivel más bajo que el actual, y un brazo de mar entraba hacia el interior de la bahía; incluso existen testimonios escritos de marineros que relatan cómo desembarcaban tierra adentro (Roselló i Verger, 1959).



Figura 1. Fragmento del Mapa Geográfico de las Islas Baleares, elaborado por Tomás López (1793). Señalado en el círculo, se aprecia la antigua albufera del Pla de Sant Jordi.

Parece lógico pensar que la costa actual ha sufrido un notable proceso de emersión, bien por procesos neotectónicos, por un descenso continuado en el nivel del mar o por ambos factores al tiempo, como indican los distintos niveles de paleoplayas y las cadenas de dunas fósiles localizadas en la zona de estudio (González-Hernández *et al.*, 2001; Goy *et al.*, 1997).

Después de estos movimientos, la albufera se convirtió un “Prat”, palabra utilizada para definir un humedal o marisma, el cual se nutría de los aportes derivados de los torrentes y, en mayor parte, por el agua almacenada en los acuíferos kársticos adyacentes y subyacentes de la zona del Pla (Roselló i Verger, 1959).

Según fue creciendo la población, aumentaron los problemas de salubridad en la bahía de Palma, ya que el humedal, al ser utilizado para verter residuos, era una fuente de enfermedades, como ponen de manifiesto la aparición de los primeros casos de malaria y paludismo.

La inundación que tuvo lugar en 1814 fue de las más importantes registradas en la historia de Mallorca. Causó varias víctimas mortales, grandes pérdidas y fue el detonante que impulsó los primeros trabajos de desecación del Pla, culminados finalmente por el ingeniero holandés Paul Bouvij a mediados del siglo XIX. Como solución a la falta de drenaje de la zona, Bouvij propuso un método por el cual, mediante una serie de molinos de viento, el agua era extraída y vertida en una red de canales y acequias que desembocaban en el mar.

El proyecto resultó ser un éxito: el nivel freático de los acuíferos que afloraba en superficie fue descendiendo y el Pla pasó de ser una zona pantanosa a convertirse en una zona fértil para cultivo. Los molinos (figura 2) siguieron bombeando el agua, que en ese momento era necesaria para regar los nuevos campos de cultivo, mientras que las acequias desaguaban el agua sobrante del regadío y la escorrentía que se producía cuando llovía intensamente (Roselló i Verger, 1959).



Figura 2. Antiguos molinos de viento en el Pla, diseñados por el ingeniero Paul Bouvij, y que hoy en día constituyen una de las estampas más típicas de la isla de Mallorca.

A principios del siglo pasado, la agricultura pasó a ser la actividad económica más importante de la zona y la principal fuente de ingresos. El potencial agrícola del Pla fue tal, que llegó a conocerse como “la despensa de Palma”.

En los años 50 y 60, la electrificación del sector agrícola supuso una nueva mejora al introducirse grupos de motobombas sumergibles, lo que motivó un aumento progresivo de las extracciones de agua (Mateos y González-Casanovas, 2009). Los vestigios existentes de zonas anegadas fueron desapareciendo progresivamente, quedando relegados hoy en día al pequeño humedal de Ses Fontanelles, situado en el borde sur del Pla, muy cercano a la Playa de Palma.

La explotación intensiva de los recursos hídricos, tanto para la agricultura como el abastecimiento urbano, produjo un descenso del nivel freático y dio lugar a un problema de salinización del acuífero por intrusión de agua marina (López-García y Mateos, 2003) con la consiguiente pérdida de calidad del agua necesaria para los cultivos (la salinización hizo cambiar el tipo de agricultura, pasando de la horticultura a cultivos forrajeros, ya resisten cierta concentración de cloruro sódico).

Al mismo tiempo, se produjo un éxodo rural causado por dos factores principales (Grimalt-Gelabert, 1985):

- 1) La construcción, a partir de 1960, del aeropuerto de Son Sant Joan¹. A él se debe una progresiva ocupación de tierras al oeste del Pla de Sant Jordi, así como la modificación de la red viaria tradicional. Vías de comunicación que antes eran básicas, como el Camí Fondo (carretera de Lluçmajor) pasaron a ser secundarias.
- 2) La llegada del turismo de masas, en concreto en la zona Can Pastilla y El Arenal, supuso un gran cambio en la economía local, creándose una nueva demanda de puestos relacionados con la hostelería y los servicios, en detrimento de los sectores agrícolas y ganaderos del Pla.

En la década de los 80 y 90, se produce un cambio importante en el uso de los recursos hídricos de la zona. Con el objetivo de frenar la disminución del nivel freático y de reducir la concentración de cloruros en el agua, el Ayuntamiento de Palma y la Empresa Municipal de Aguas y Alcantarillado de Palma (EMAYA) empezaron a suministrar las aguas residuales depuradas a los agricultores del Pla, quienes las utilizan para el regadío de sus cultivos (figura 3); si bien, se registró un paulatino descenso de la demanda debido al abandono progresivo de la actividad agraria por el escaso rendimiento económico y por la falta de relevo generacional.



Figura 3. Imagen área de la central depuradora EDAR Palma I y II, afectada por inundaciones. Se aprecia la balsa donde se almacenan las aguas que usan los agricultores para regar sus cultivos.

¹ Debido a su proximidad a la ciudad de Palma, a la imposibilidad de ampliar el aeropuerto de Son Bonet y a la proliferación del turismo en la zona de Can Pastilla y El Arenal, en 1960 se transformó en el nuevo aeropuerto de Mallorca. Actualmente el tercer aeropuerto en importancia de España por volumen de pasajeros.

Esta medida redujo el riesgo de intrusión marina pero favoreció el ascenso del nivel freático, generando un excedente hídrico en el acuífero e incrementando la frecuencia y severidad de los episodios de inundación en el Pla (López-García, 2003).

Por lo tanto, desde las últimas décadas y hasta hoy en día, la zona del Pla de Sant Jordi está sometida a episodios de inundaciones periódicas por el ascenso progresivo de los niveles piezométricos, debido a (Robledo, 2015 y 2016):

- 1) La existencia de una deficiente y antigua red de drenaje superficial.
- 2) El abandono de las explotaciones agrícolas.
- 3) Un incremento del riego con aguas residuales depuradas.

Además, se ha podido constatar que el antiguo humedal desecado de Sant Jordi, aunque es un sistema residual, intenta restituirse de forma natural, contribuyendo a la subida continuada de los niveles piezométricos desde finales de la década de los 80. Dependiendo de la intensidad de los eventos de lluvias torrenciales, estas inundaciones son más o menos acusadas, pero en todo caso, constituyen varios problemas para la población del Pla (Díez-Herrero *et al.*, 2015):

- **Problemas por anegamiento de campos agrícolas:**

Las inundaciones de los campos de cultivo del Pla es el principal motivo de queja por parte de los agricultores de la zona, ya que las pérdidas económicas que producen son cuantiosas. El anegamiento periódico de los campos supone, no solo la pérdida de la cosecha del año en el que ocurre, sino también la inhabilitación de esos terrenos para ser cultivados durante los dos o tres años siguientes (según declaraciones de los agricultores), al quedar el suelo colmatado por limos y arcillas en condiciones anóxicas. Estas condiciones hacen que la práctica de la agricultura no sea rentable y el sector reclama indemnizaciones y soluciones al Gobierno Balear continuamente.

- **Problemas de salubridad pública:**

Cada primavera, se producen importantes plagas de mosquitos debido a las aguas estancadas, agravadas por la proliferación de especies exóticas, como el mosquito tigre. Son frecuentes las protestas, denuncias y concentraciones por parte de las asociaciones de vecinos exigiendo al Ayuntamiento y al Gobierno Insular soluciones definitivas a este problema de salud pública (figura 4 A) que no sólo pone en peligro a la población de la zona (residentes y turistas), sino también al ganado, en especial el equino.

- **Problemas por inundación de áreas construidas:**

El Pla está abierto al mar por su vertiente sur, donde se encuentra la zona denominada Playa de Palma, situada en los núcleos turísticos de Can Pastilla y El Arenal. Se trata de una de las playas más extensas de toda la isla y su proximidad a la ciudad de Palma hizo que el sector turístico se desarrollara mucho en la segunda mitad del siglo XX. Este desarrollo trajo consigo la construcción de grandes complejos turísticos y la proliferación de segundas residencias en la zona, que fueron edificadas sobre el antiguo cordón de dunas que separaba el mar de la antigua albufera o marisma.

La baja permeabilidad de los suelos (al ser asfaltados o construidos) hizo disminuir su capacidad de infiltración y generó un cambio en el drenaje natural de la zona, aumentando así la escorrentía superficial. A su vez, los drenajes naturales del Pla hacia el mar se redujeron a unas pocas salidas artificiales (figura 4 B), donde se concentran los problemas de desbordamiento y anegamiento de las zonas urbanizadas.

- **Problemas por afección a infraestructuras de transporte:**

Actualmente, las principales infraestructuras que cruzan y comunican las localidades del Pla son: la Ma-15 (Carretera de Manacor), la Ma-19 (Autopista de Levante) y la Ma-30 (también denominada Segundo Cinturón y perpendicular a las anteriores). Estas carreteras ya interferían en el drenaje natural de la zona y los problemas se agravaron cuando, debido al aumento del turismo en la isla, se planteó su desdoblamiento. Aunque estas vías cuentan con numerosos drenajes artificiales, estos resultan insuficientes para evacuar el agua acumulada durante los episodios de lluvias torrenciales. Las zonas de vía anegadas por el agua son un peligro para la conducción y, en algunas ocasiones, varios tramos de estas carreteras han tenido que ser cortados al tráfico (figura 4 C). Además, en la zona de estudio existen numerosas carreteras, caminos y redes de comunicaciones o transporte de energía que también sufren las consecuencias de las inundaciones.

El aeropuerto de Son Sant Joan es otra de las grandes infraestructuras afectadas por los problemas de inundación durante los episodios de lluvias torrenciales. El aeropuerto consta de dos pistas principales, paralelas entre sí y que impiden el drenaje natural de la zona, modificando de forma muy importante los flujos de agua subterránea y, por tanto, la distribución espacial y la recarga del acuífero (Robledo, 2015). Unido a ello, el terreno sobre el que está construido el aeropuerto presenta una topografía bastante plana y el nivel freático se sitúa muy cerca de la superficie, por lo que es frecuente observar zonas anegadas por el agua, muy cercanas a las pistas (figura 4 D). Aunque se ha intentado corregir este problema con numerosos pozos de drenaje y bombas de aspiración, tras episodios de lluvias intensas se siguen observando grandes zonas con agua estancada. Estas áreas constituyen un doble problema para la seguridad aérea: 1) los pilotos se quejan de los reflejos de las balizas de iluminación nocturna en el agua, y 2) se ha producido un aumento de aves en la zona, atraídas por los mosquitos que proliferan en el agua acumulada, y que suponen un riesgo de colisión con las aeronaves.



Figura 4. A: Concentración de vecinos de San Jordi en contra de las plagas de mosquitos. B: Zona de desagüe artificial bajo el paseo marítimo de El Arenal. C: Tramo de la Autopista de Levante Ma-19 anegado por el agua. D: Imágenes aéreas de zonas inundadas cercanas a las pistas del aeropuerto de Son Sant Joan.

1.2 Objetivos del trabajo

Como se ha sintetizado en el apartado anterior, las actuaciones antrópicas que ha sufrido la zona del Pla, fundamentalmente durante los dos últimos siglos, han condicionado los problemas de inundabilidad actuales.

Diversos sectores del Pla de Sant Jordi pueden considerarse desde el punto de vista científico-técnico y legal (según la Ley de Aguas y los RR.DD. 9/2008 y 903/2010) como zonas inundables por su evolución geológica reciente (Cuaternario), su configuración geomorfológica actual, las características meteorológicas y por las actuaciones antrópicas realizadas en este territorio. Buena prueba de ello son los numerosos eventos de inundación que se han producido en las últimas décadas, con el anegamiento recurrente de algunos sectores del Pla (Díez-Herrero *et al.*, 2015).

Con el fin de dar una respuesta técnica que permita evitar o paliar los efectos de las inundaciones, la Empresa Municipal de Aguas y Alcantarillado de Palma de Mallorca (EMAYA) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) firmaron un convenio de colaboración en el año 2013. Las investigaciones interdisciplinares realizadas en el marco de este proyecto, denominado con el acrónimo POSEIDÓN, (figura 5) se han centrado en diagnosticar las causas y los procesos ligados al fenómeno intermitente de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi, proponiendo una serie de soluciones en un entorno enormemente complejo (Robledo *et al.*, 2014; Robledo, 2015 y 2016).

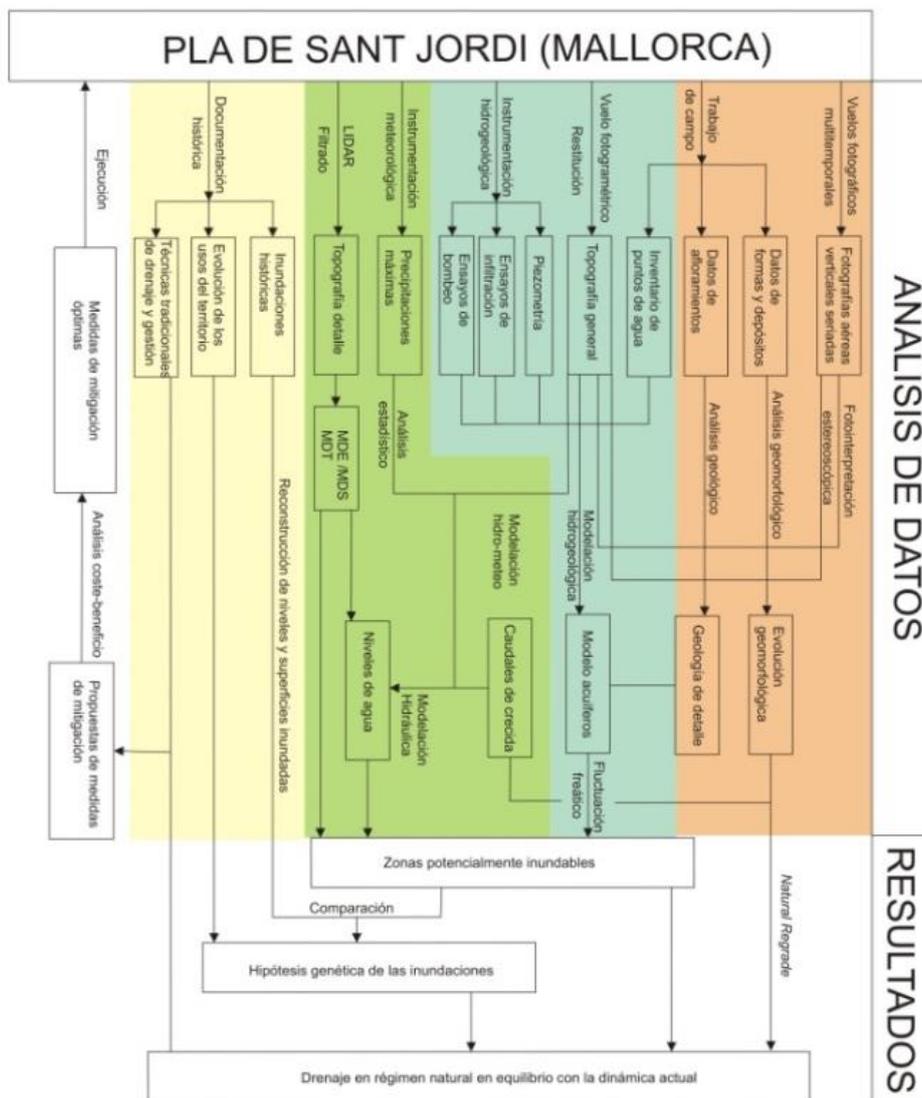


Figura 5. Diagrama de flujo general del proyecto Poseidón. Fuente: Robledo *et al.*, 2014.

En el planteamiento de dar soluciones a este problema, todos los estudios se centraron en el acuífero detrítico libre que abarca toda la cuenca, y que es hidráulicamente muy complejo, entre otros aspectos porque había que despejar la incertidumbre de la relación de los niveles piezométricos con las inundaciones intermitentes así como la identificación de puntos de descarga de elevado caudal, en la zona norte del área de estudio.

Aunque existían trabajos previos que apuntaban vagamente la posible influencia de las oscilaciones del nivel freático del acuífero en las inundaciones durante eventos de precipitaciones extremas (De la O y Gil, 1996; Estiu, 2007), los trabajos no habían constatado este aspecto ni determinado las relaciones entre las oscilaciones del nivel piezométrico del acuífero y los momentos de inundación, así como tampoco un cálculo de la superficie inundada en eventos pretéritos o potencialmente inundables, con estimaciones del volumen.

Los resultados del proyecto POSEIDÓN pusieron de relieve un problemática mucho más compleja en la que intervienen muchos factores, pero cuyo eje central era precisamente que las inundaciones en la gran mayoría de ocasiones se producen por un afloramiento de la lámina de agua por encima de la superficie del terreno durante periodos de intensas precipitaciones. Este hecho, se ve amplificado por el agua que procede de las surgencias naturales al norte, concretamente el Ullal de Son Mir, por la ineficiencia de las redes de drenaje artificiales del Pla o por el cambio en la hidrogeología del terreno debido a la intensa antropización del mismo.

No obstante, otros eventos de inundaciones menos habituales están ligados a fenómenos de avenidas, aunque el mecanismo de desbordamiento deriva de uno de los torrentes principales y está asociado a las precipitaciones intensas en la cabecera del torrente, localizado en la Serra de Tramunta. Con todo ello, se pudo elaborar diversas cartografías sobre superficie inundada real, superficie inundable y zonas más o menos susceptibles de inundarse, de acuerdo con dos factores: 1) la profundidad del nivel freático y 2) las características hidráulicas del terreno (zonas de mayor o menor permeabilidad y/o capacidad de infiltración).

Este último aspecto fue clave para iniciar en colaboración con EMAYA el estudio y la cartografía en detalle de la permeabilidad del terreno, ya que esta particularidad tan importante en una zona como el Pla de Sant Jordi, que en sí misma es un acuífero detrítico libre, condiciona varios aspectos: a) zonas con características hidráulicas del suelo que favorecen inundaciones; b) zonas con características hidráulicas del suelo que no favorecen inundaciones; c) distribución y zonación de las áreas con una mayor o menor recarga potencial del agua de lluvia; d) planificación y gestión, de acuerdo con los parámetros hidráulicos para una proyectos futuros de recarga artificial del acuífero y, por tanto, determinar zonas de recarga y zonas de bombeos..

De acuerdo con las recomendaciones recogidas en el informe final del proyecto científico-técnico POSEIDÓN, entre los años 2013 y 2015, se indica la necesidad de realizar un mapa de infiltración del Pla de Sant Jordi (Robledo, 2015). Esto permitiría tener una herramienta muy importante para la planificación y gestión del territorio, en todas las vertientes que se han estudiado en el proyecto, especialmente en el ámbito de las aguas subterráneas.

En este contexto se enmarca el presente trabajo, planteado como un estudio que da un paso más al realizado en el año 2015 (Moreno *et al.*, 2015), y cuya finalidad es determinar y representar en un mapa la distribución espacial de la permeabilidad y capacidad de infiltración de los suelos del Pla de Sant Jordi.

En último lugar, agradecer a la dirección de EMAYA su estrecha colaboración y a todos los propietarios de las fincas particulares del Pla por facilitar el acceso a las zonas de trabajo.

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Localización y características geográficas y climáticas del Pla de Sant Jordi

El Pla comprende una superficie total de 350 km², aunque la zona objeto de estudio y en la que se producen los fenómenos más importantes de inundación se sitúa en torno al aeropuerto de Son Sant Joan, abarcando un área de estudio en torno a los 85 km² (figura 6).

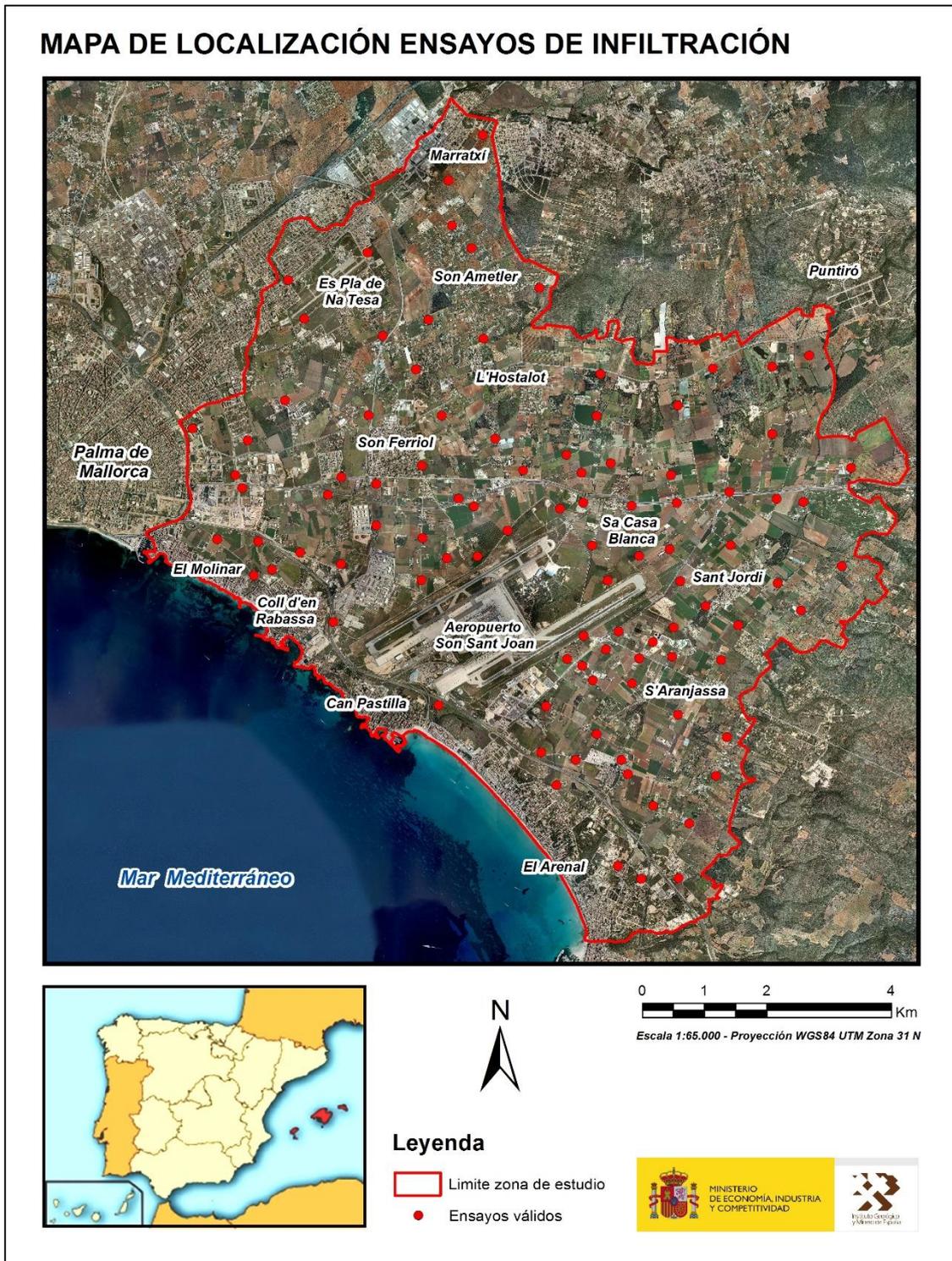


Figura 6. Área de estudio y localización de los puntos donde se han realizado los ensayos de infiltración.

Comprende las localidades costeras de Palma, El molinar, Coll d'en Rabassa, Can Pastilla y El Arenal, y los núcleos urbanos interiores de Son Ferriol, Pla de Na Tesa, Marratxi, L'Hostalot, Sa Casa Blanca, Sant Jordi, S'Aranjassa y Es Pil.larí.

Como se ha comentado en apartados anteriores, se trata de una zona próxima a la ciudad de Palma, muy antropizada y en continua transformación. Aproximadamente un tercio de su superficie (27,5 km²) está ocupada por infraestructuras, terrenos industriales, campos de golf o suelo urbano de alta y baja densidad (figura 7).

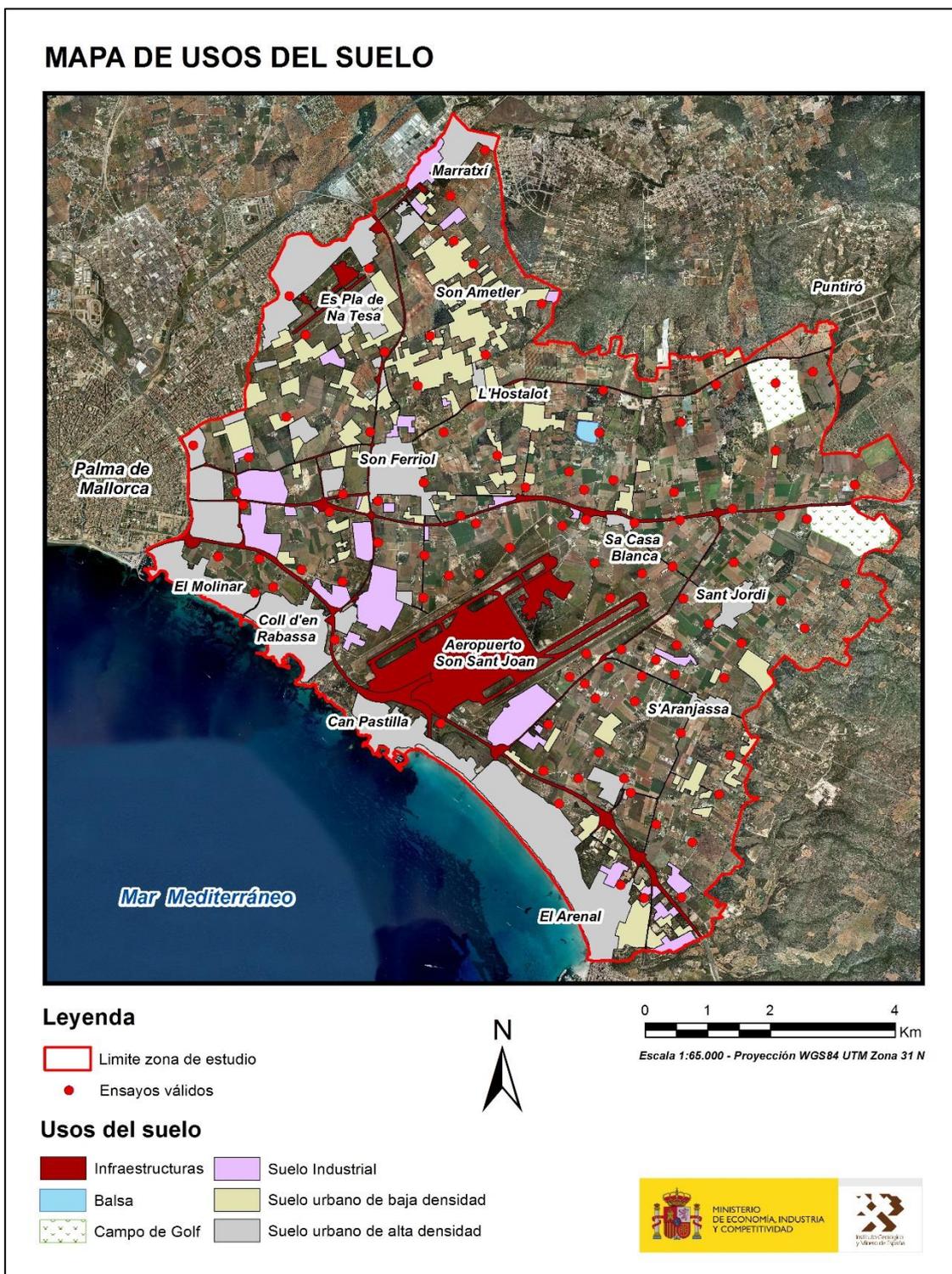


Figura 7. Diferentes usos del suelo del área de estudio, exceptuando el uso agrícola.

El resto de superficie, 57,5 km², está ocupada fundamentalmente por fincas agrícolas, siendo en su mayor parte cultivos forrajeros de regadío (alfalfa) junto con cultivos de cereales o pequeñas explotaciones hortícolas y de frutales (figura 8, página siguiente). Como se ha comentado en apartados anteriores, debido a los problemas de salinización y al éxodo rural, parte de estas explotaciones están actualmente abandonadas, fragmentadas por vías de comunicación u ocupadas por usos urbanos, recreativos o industriales.

El clima predominante en toda la isla de Mallorca es el Mediterráneo, un clima templado donde los inviernos no alcanzan valores extremos de frío y suelen ser lluviosos, mientras que los veranos son secos y bastante calurosos (por encima de los 30°C).

En el caso de Mallorca, las precipitaciones se suelen dar en forma líquida (aunque a veces nieva) y sus valores máximos se suelen registrar en los meses de otoño (octubre-noviembre) pudiéndose recoger casi el 40% del total anual; y los mínimos en los meses de verano (julio y agosto). Los valores medios normales de precipitación para todo el territorio están entre los 450 mm y 650 mm anuales (figura 9). El régimen de precipitaciones se caracteriza por su irregularidad, siendo muy típicas las tormentas o aguaceros intensos y de corta duración que dejan grandes cantidades de lluvia, lo que puede llegar a causar avenidas o inundaciones (Díez-Herrero *et al.*, 2015):

Valores medios de precipitación en Palma (1980 - 2010).

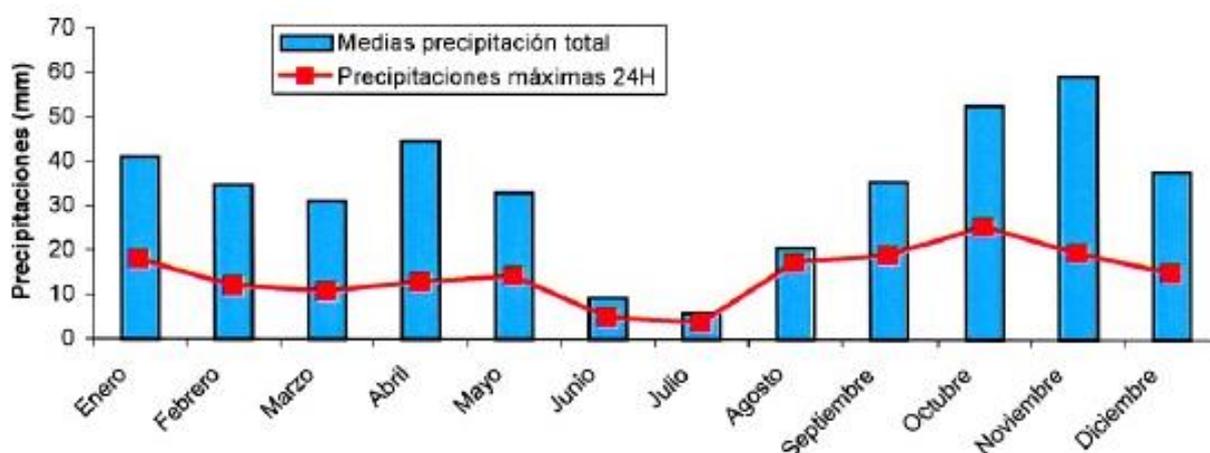
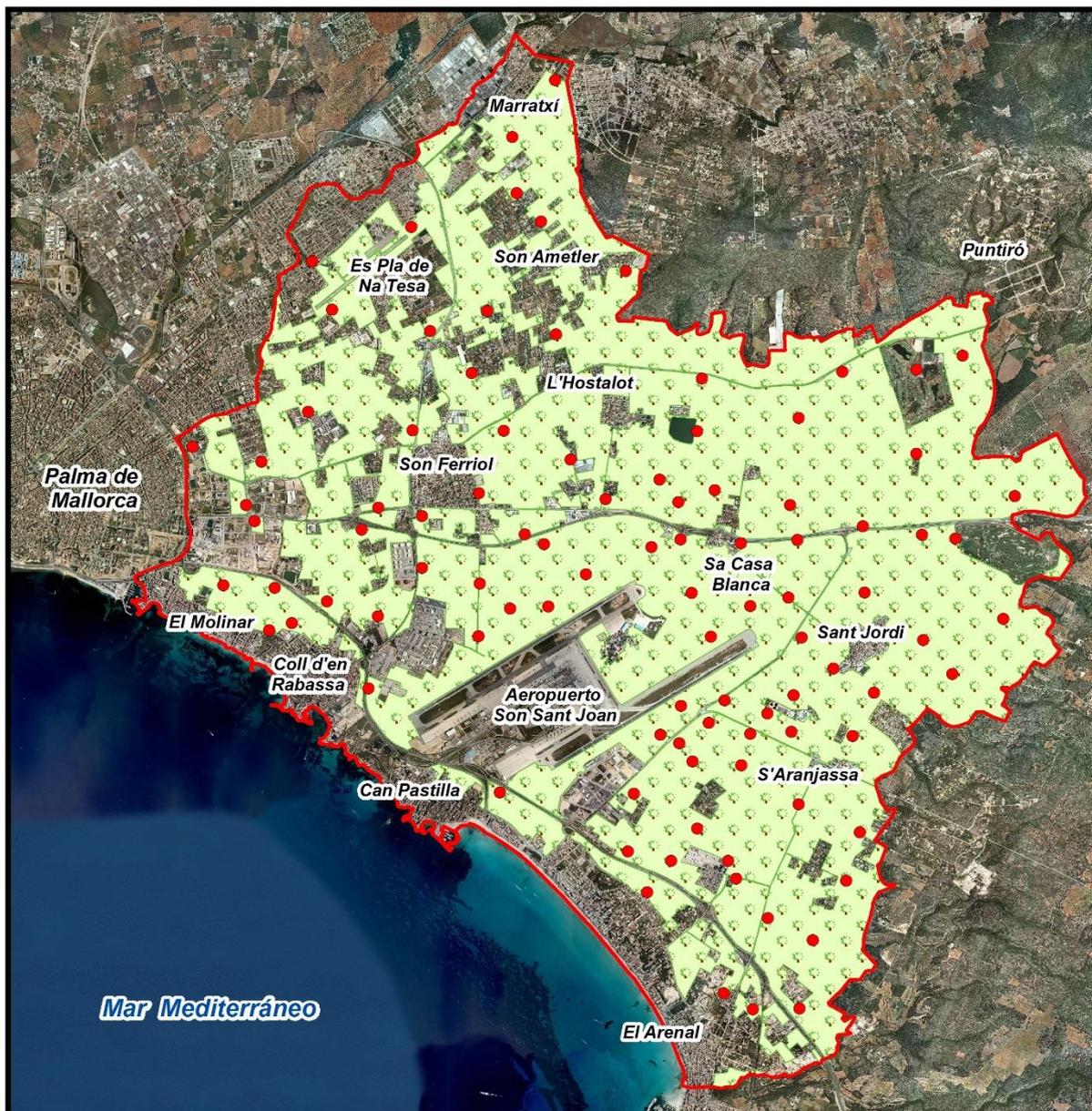


Figura 9. Gráfico representativo de los valores medios mensuales y máximos diarios de precipitación en Palma en un período de 30 años. Se aprecia un pico de precipitaciones en los meses de octubre-noviembre y valores mínimos en los meses de verano (Díez-Herrero *et al.*, 2015).

MAPA DE SUELO AGRÍCOLA Y CULTIVOS

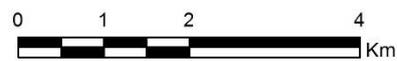


Leyenda

- Limite zona de estudio
- Ensayos válidos

Uso del suelo

- Agrícola y cultivos



Escala 1:65.000 - Proyección WGS84 UTM Zona 31 N



Figura 8. Zonas de uso agrícola y de cultivos en el área de estudio.

2.2 Síntesis geológica, geomorfológica e hidrogeológica

La isla de Mallorca forma parte del archipiélago Balear, parte emergida del umbral submarino denominado Promontorio Balear y prolongación de la cordillera Bética. Estructuralmente, esta cadena montañosa se formó durante el Cenozoico (finales del Oligoceno y principios del Mioceno, 25-30 Ma), debido al choque entre la placa tectónica africana y la placa Euroasiática.

Tras la finalización del régimen compresivo que supuso la Orogenia Alpina, durante el Mioceno medio (15-13 Ma), el archipiélago experimentó una fase de extensión y rotación, hasta su posición actual en el Mediterráneo. En esta época, se generaron en la isla de Mallorca un conjunto de grandes fallas normales y extensivas, creándose un sistema de *horsts* y *grabens* con una orientación preferente NE-SO (Pomar *et al.*, 1983; Colombo *et al.*, 1991; Gelabert y Sabat, 2004):

- Los bloques elevados o *horst*, forman en la actualidad las principales sierras de la isla: Tramuntana, Central y de Levante (letras A, B y C respectivamente de la figura 10), constituidas por materiales Mesozoicos, fundamentalmente arenos-arcillosos (Trías) calcodolomíticos (Jurásico) y margo-arcillosos (Cretácico).
- Los bloques hundidos o *graben* están representados por varias cuencas sedimentarias o llanos, como el Llano de Palma, el de Inca o el de Campos (letras D, E y F respectivamente de la figura 10), rellenos por materiales Terciarios y Cuaternarios. Estos materiales presentan series más complejas, con bastante variabilidad de facies desde el borde al centro de las cuencas, pero por lo general, dominan materiales arenos-arcillosos.

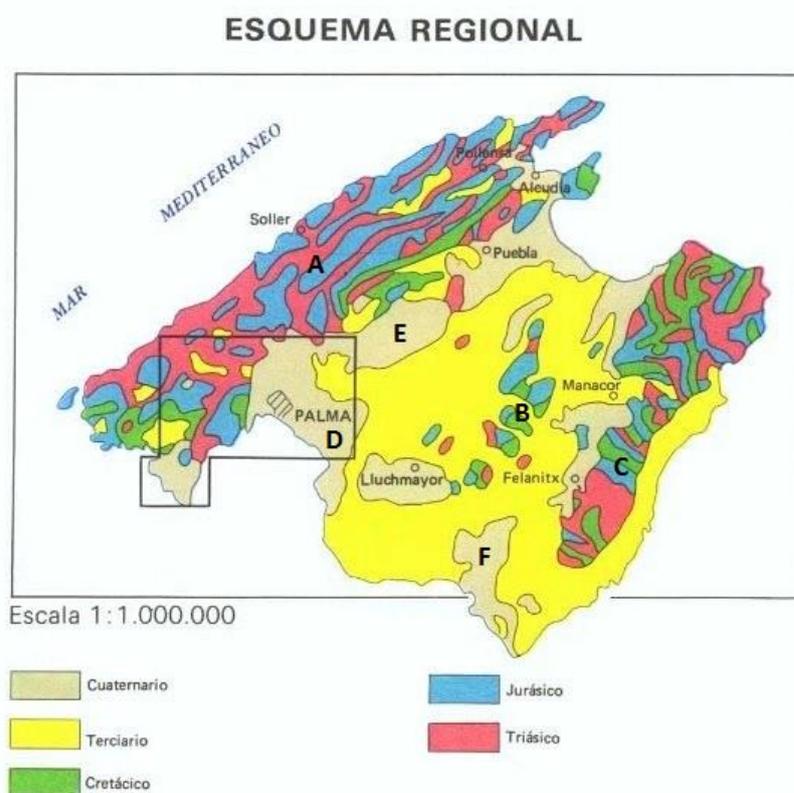


Figura 10. Mapa geológico de la isla de Mallorca. Extracto del mapa geológico de España, hoja 698 - Palma. Escala 1:50.000. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Si nos centramos en la zona de estudio, el Pla de Sant Jordi (también conocido como Llano de Palma) forma parte de uno de estos *graben*, creando un cuenca subsidente delimitada por fracturas de origen tectónico y colmatada por sedimentos post-orogénicos, desde el Mioceno superior hasta el Cuaternario, llegando a alcanzar en algunos puntos espesores de hasta 450m (Barón, 1987).

Los **materiales geológicos** presentan una elevada complejidad estratigráfica, ligada a la presencia de frecuentes cambios de facies asociados a los distintos ambientes sedimentarios que se han ido sucediendo durante los 11 Ma de historia del relleno post-orogénico de la cuenca (López-García, 2015).

Las litologías que se encuentran en la zona de estudio son de edad cuaternaria (Q) y terciaria (T), de origen sedimentario y que abarcan diferentes tipos de texturas: conglomerados, gravas, arenas, limos, arcillas, margas, calizas o calcarenitas (figura 11).

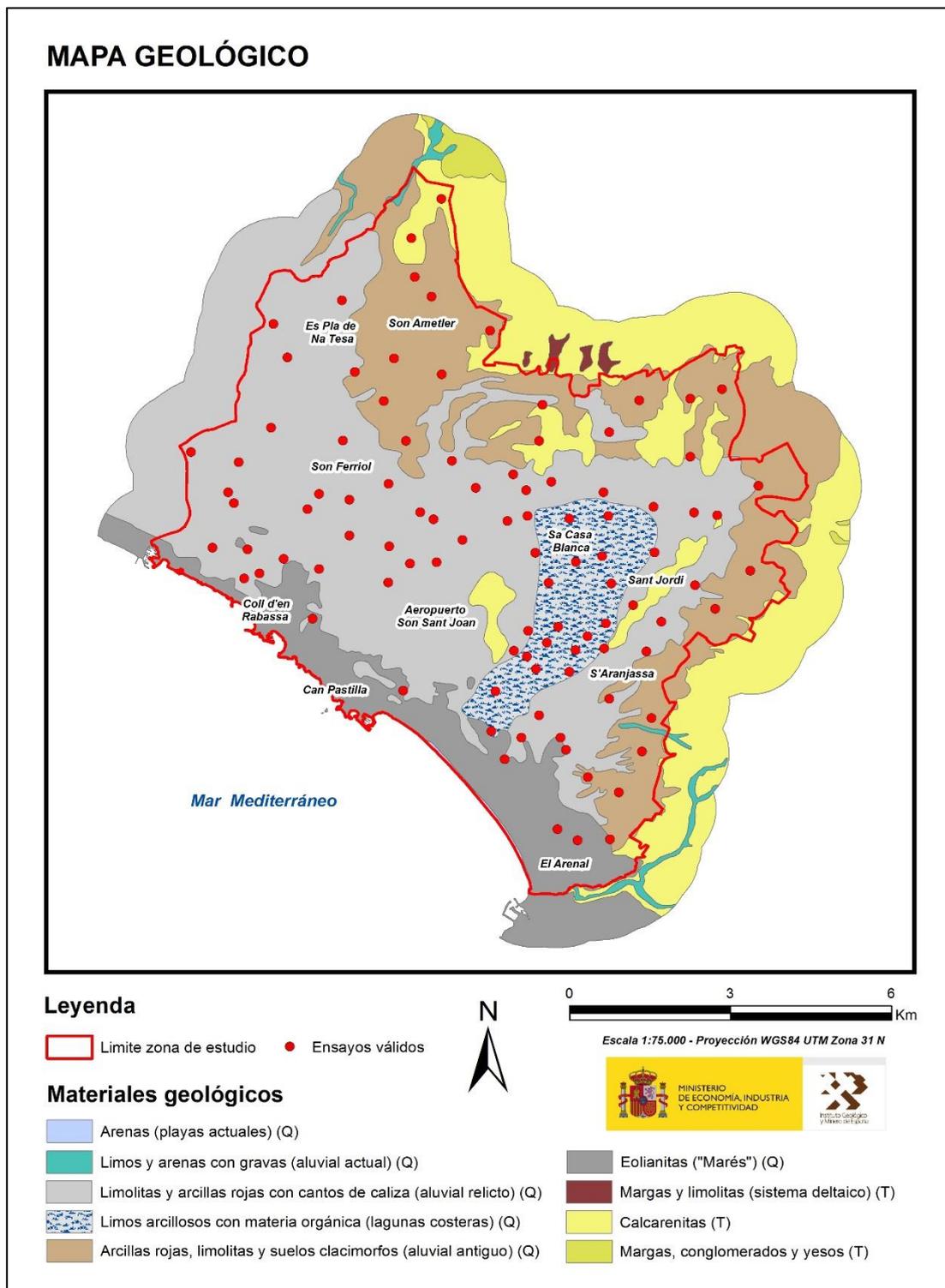


Figura 11. Mapa geológico de la zona de estudio del Pla de Sant Jordi.

Desde el punto de vista orográfico, es un área muy plana en la que apenas hay diferencias importantes de cota topográfica, con pendientes que no superan en la mayor parte de la zona de estudio los dos grados de desnivel.

Las principales **unidades geomorfológicas** del Pla (figura 12) son aquéllas que corresponden a materiales sedimentados recientemente (Goy et al., 1997):

- Depósitos de vertiente, conos de deyección o abanicos fluviales, compuestos por los materiales aportados por los torrentes.² Estas formaciones están asociadas a los flujos de aguas ligados a lluvias torrenciales, capaces de desbordar el cauce por donde circulan, dejando un manto detrítico compuesto por materiales de diferentes texturas que varía dependiendo la intensidad de la corriente: arcillas, margas, limos, arenas, gravas, cantos rodados, bolos, bloques, etc. Estas formaciones se localizan al pie de las laderas y en las zonas de borde de la cuenca sedimentaria que conforma el Llano de Palma.
- Depósitos de dunas eólicas, algunas ya consolidadas y otras aún en proceso de cementación, se localizan en la zona de costa; no tienen gran espesor y están bastante mezcladas con materiales cuaternarios aluviales.
- Depósitos lagunares o de albufera, que han rellenado las depresiones interiores dando lugar a zonas pantanosas, formando incluso salinas como la de Ses Fontanelles, localizada entre los cordones de dunas en la zona de Can Pastilla y El Arenal.

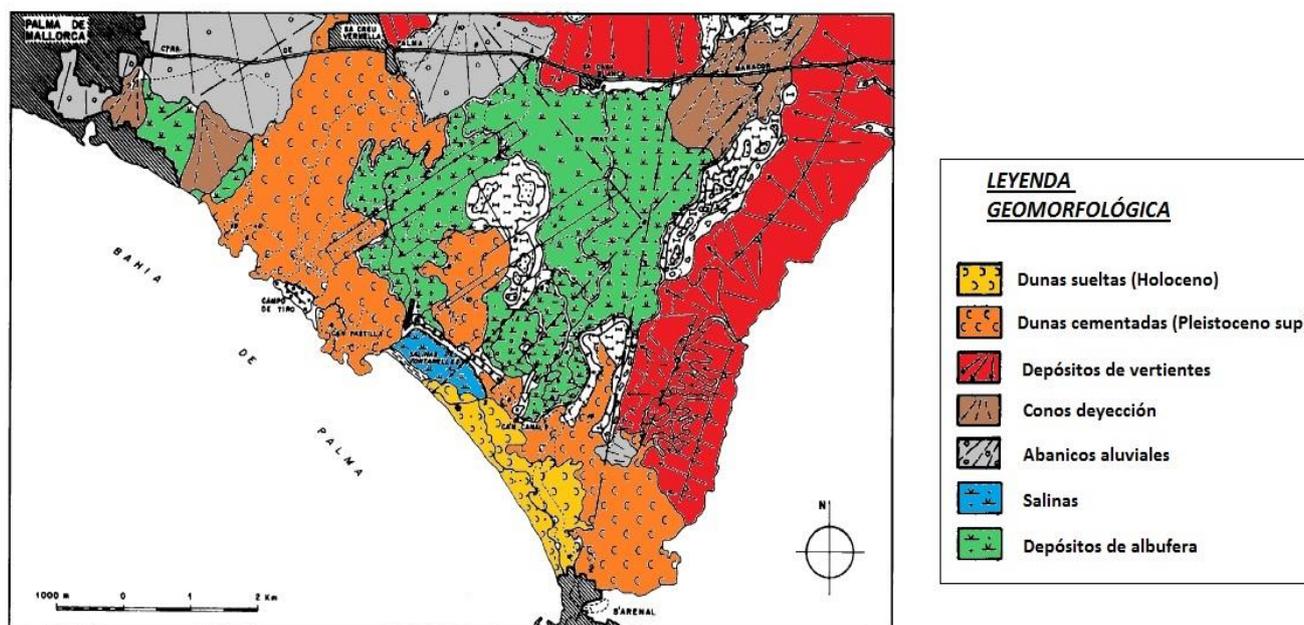


Figura 12. Mapa geomorfológico modificado de la zona del Pla de Sant Jordi (Goy et al., 1997).

² Es necesario indicar que en Mallorca no existen cursos de agua permanentes. Este hecho se debe fundamentalmente a dos factores: el tipo de litología predominantemente calcárea, que favorece la infiltración, mermando la escorrentía superficial; y la distribución irregular de sus precipitaciones por toda la isla

La **característica hidrogeológica** más importante del Llano de Palma es la existencia de dos masas de agua subterránea diferenciadas: un acuífero superficial formado por materiales de edad Pliocuaternaria (PL+Q) y otro más profundo, del Mioceno superior (M). En la actualidad, únicamente se explota el acuífero superior (figura 13), abierto al mar a lo largo de toda la línea de costa y constituido por materiales calcareníticos del Plioceno superior (PL2) y sedimentos cuaternarios suprayacentes (Q) (López-García, 2003).

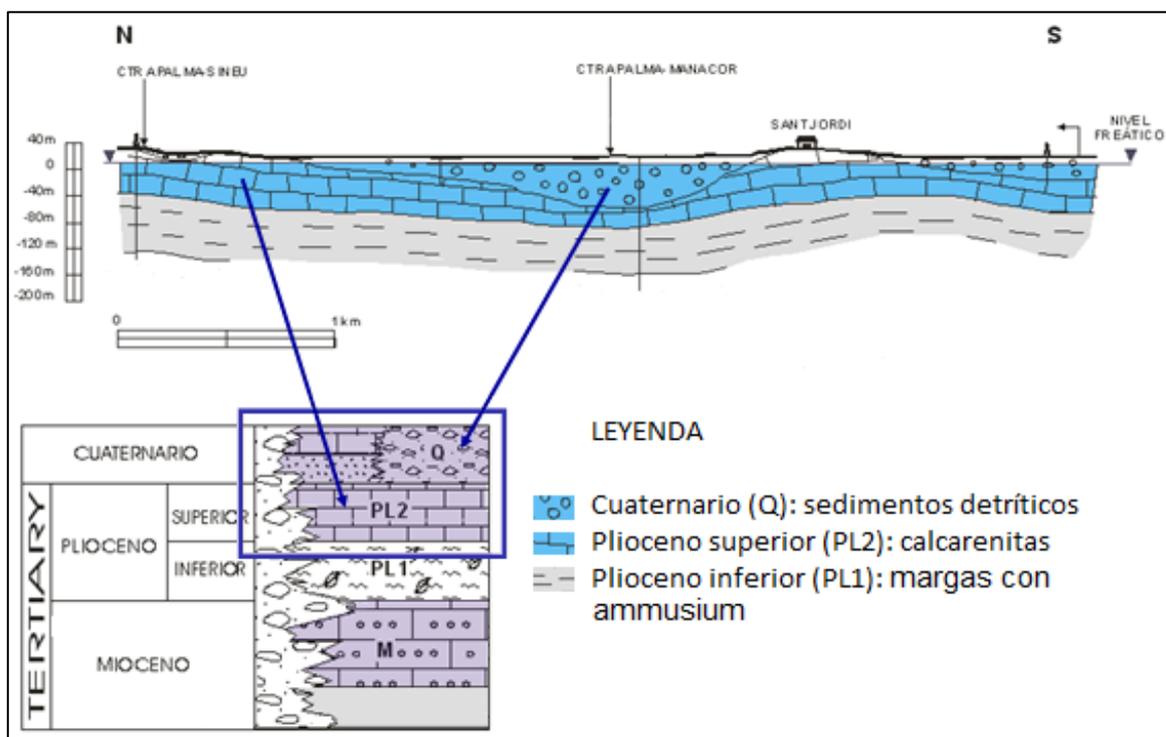


Figura 13. Caracterización hidrogeológica del Pla de Sant Jordi. En azul aparecen las principales unidades que funcionan como acuíferos y en gris las unidades impermeables (modificado de López-García, 2003).

En detalle, el acuífero detrítico superior del Pla de Sant Jordi (PL2 + Q) está formado por dos unidades geológicas conectadas mecánica e hidráulicamente entre sí (López-García, 2015):

- Acuífero superior Plioceno (PL2): se dispone mayoritariamente sobre la formación PL1, constituida por un paquete de margas con *Ammusium* que actúa como base impermeable. Es un importante acuífero, de elevada porosidad, compuesto de calcarenitas y lumaquelas fracturadas que han pasado por varias fases de karstificación durante las fluctuaciones eustáticas del nivel del mar durante el Plioceno y el Cuaternario.
- Acuífero superior Cuaternario (Q): las formaciones cuaternarias que lo componen presentan una gran diversidad litológica, lo que da lugar a una gran heterogeneidad en sus parámetros hidráulicos. Constituye una unidad acuífera de comportamiento complejo (acuífero multicapa).

En las zonas de contacto entre ambos acuíferos, ubicadas en el borde norte del Pla de Sant Jordi, las diferencias entre cada litología dan lugar a manantiales surgentes, como el Ullal de Son Mir, muy caudalosos, por lo que es necesario bombearlos para paliar el problema de las inundaciones, en los que juegan un rol muy importante.

3. METODOLOGÍA

3.1 Método procedimental

El método empleado para la determinación de la conductividad hidráulica saturada *in situ* está recogido en [Hatt y Le Coustumer \(2008\)](#), se basa en el empleo de un cilindro sencillo bajo carga constante. El cilindro se introduce en el suelo a una profundidad de 5 cm y el ensayo se realiza a dos alturas de presión o cargas potenciales diferentes: 5 y 15 cm (figura 14).

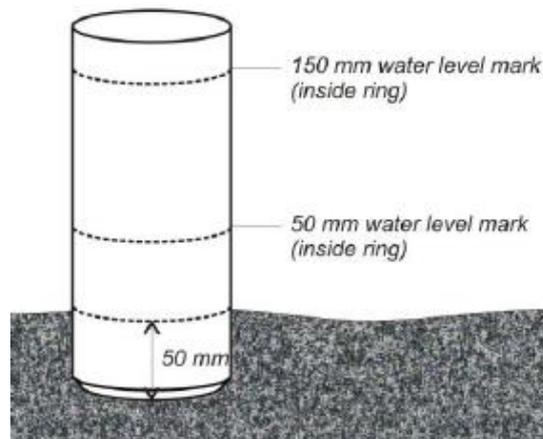


Figura 14. Cilindro sencillo empleado en el ensayo de infiltración. Fuente: [Hatt y Le Coustumer \(2008\)](#).

Las ventajas de emplear este método se sintetizan en la tabla 1:

| Ventajas del método |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Técnica fácil de aprender.• Es un método relativamente rápido de ejecutar.• La toma de datos es sencilla y proporciona resultados <i>in situ</i>.• El equipo necesario es poco voluminoso, ligero y barato.• El volumen de agua necesario es muy reducido. |

Tabla 1. Ventajas del método empleado en los ensayos de infiltración.

Con la finalidad de reducir la incertidumbre inherente a este tipo de ensayos, se han realizado dos repeticiones (A y B) por cada ensayo, a un mismo tiempo y a una distancia aproximada de un metro, repitiendo el ensayo en caso de que la discrepancia entre ambas repeticiones supere el 20%. De esta forma, cada punto tendrá dos valores de conductividad hidráulica saturada, y la media de estos valores será la conductividad hidráulica saturada final de ese ensayo.

Se ha tenido especial cuidado en ubicar los cilindros en zonas representativas, evitando áreas compactadas por vehículos o personas.

- Desarrollo del ensayo:

1. Una vez localizado el lugar en donde se realizará el ensayo, se anota la fecha y hora, coordenadas, condiciones meteorológicas y cualquier otra observación: acceso al lugar, tipo de propiedad, características y usos del suelo, presencia de raíces, grietas, etc. También se tomarán fotos del punto del ensayo y del entorno.
2. Al situar cada cilindro sobre la ubicación elegida, deben retirarse las plantas u hojas que cubran el suelo y comprobar que no existan grietas ni queden piedras o raíces bajo el filo, ya que al clavarlo, pueden deformarlo. Ambos cilindros (A y B) deberán estar a una distancia cercana el uno del otro, no mayor de 2 metros.
3. Colocar un bloque de madera en la parte superior. Golpear suavemente con el mazo hasta enterrar el cilindro 5 cm de profundidad. El cilindro debe clavarse de forma lenta y cuidadosa, para minimizar la alteración del suelo. Asegurarse de que tenga una profundidad uniforme en todo su perímetro, ya que los cilindros ladeados presentan un mayor riesgo de sufrir fugas de agua. Es recomendable usar un nivel para comprobar que el cilindro esté nivelado.
4. Marcar en los trozos de cinta métrica 5 y 15 cm con un rotulador indeleble y sujetarlos al borde del cilindro con una pinza.
5. Una vez instalados los cilindros y antes de iniciar el ensayo, es recomendable regar la zona para llevar al suelo a un grado de humedad elevado y acelerar así el proceso de estabilización. Durante los ensayos, resulta conveniente utilizar agua de composición similar a la zona de la zona de estudio.
6. Se comienzan a llenar cuidadosamente de agua hasta una altura (o profundidad de encharcamiento) de 5 cm desde la superficie del suelo. Puede “tapizarse” el suelo del interior del cilindro con arena gruesa, grava o algún tipo de plástico. De esta forma se evita que el impacto directo del agua sobre el suelo desnudo provoque la desagregación de las partículas y el sellado de los poros.
7. Iniciar el cronómetro cuando el nivel del agua alcanza los 5 cm en ambos cilindros al mismo tiempo y mantener el nivel de agua en esa altura usando las diferentes probetas graduadas de medición (usar la probeta más pequeña para volúmenes de agua más precisos), registrando el volumen de agua requerido en cada intervalo de tiempo (generalmente varía entre 2 - 5 minutos dependiendo de la velocidad de infiltración). Es aconsejable realizar las medidas a intervalos de tiempo regulares, de este modo es más fácil identificar cuando la tasa de infiltración permanece constante.
9. En las primeras mediciones debe comprobarse que no existan fugas de agua en la base de los cilindros, provocadas por la presencia de grietas, piedras o raíces. Si se cumplen escrupulosamente los apartados 1 y 2, esto no debería pasar. Es recomendable no realizar estos ensayos mientras que esté lloviendo, ya que una cantidad significativa de gotas de lluvia puede alterar el nivel de la lámina de agua del interior del cilindro.
10. Continuar vertiendo agua hasta que el volumen vertido por unidad de tiempo permanezca constante durante varias mediciones seguidas, al menos seis. En suelos con varios horizontes de características diferentes, el paso del frente húmedo de un horizonte a otro quedará reflejado por oscilaciones de la tasa de infiltración hasta su estabilización final. Por lo tanto, es muy importante no finalizar el ensayo hasta que no se haya alcanzado una tasa de infiltración constante, ya que se está midiendo la conductividad hidráulica en condiciones de saturación y es básico confirmar que todos los horizontes por los que circula el agua lo estén.

11. Una vez alcanzada una tasa de infiltración constante, llenar el cilindro a una altura de 15 cm. Reiniciar el cronómetro y repetir los pasos anteriores para esta altura. Puesto que el suelo ya está saturado, el tiempo requerido para alcanzar una infiltración constante debe ser menor para esta segunda profundidad de encharcamiento.

12. Al finalizar los ensayos de infiltración, se toman tres muestras de suelo mediante un cilindro normalizado, con un radio de 2,5 cm y una altura de 5 cm (una muestra del interior del cilindro, denominada "SAT" y otras dos del exterior de cada repetición, A y B) para la posterior caracterización de parámetros físicos y clasificación granulométrica.

Antes de recoger el equipo, es recomendable rociar los cilindros utilizados en el ensayo de infiltración y en la toma de muestra con un spray limpiador para evitar su oxidación.

3.2 Cálculos

Cuando se emplea un infiltrómetro de cilindro para calcular la permeabilidad, se puede demostrar, aplicando la ecuación de Darcy, que el valor obtenido de la tasa de infiltración básica (f_0) es igual a la conductividad hidráulica saturada si la filtración es estrictamente vertical y el perfil del suelo es profundo y uniforme. La verticalidad del bulbo de infiltración se garantiza, en el caso de los infiltrómetros de doble anillo, mediante el efecto barrera que provoca la presencia del anillo exterior. En el caso de emplear un único anillo se puede obtener una buena aproximación prolongando suficientemente el tiempo de medida, especialmente si la humedad del suelo al comienzo del ensayo no es suficientemente elevada.

Con el fin de ajustar los valores de la tasa de infiltración básica (f_0) a los de conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) más plausibles, se han recalculado los valores obtenidos mediante el ajuste de [Reynolds y Elrick \(1990\)](#). Estos autores proponen la siguiente formulación matemática para interpretar los datos de ensayos bajo carga constante:

$$K_{fs} = \frac{G}{a} \left(\frac{Q_2 - Q_1}{H_2 - H_1} \right)$$

Donde:

- K_{fs} Conductividad hidráulica saturada en campo.
- G Factor adimensional.
- a Radio del cilindro (4,9 cm).
- Q_1 Caudal en la primera carga potencial (mL infiltrados / tiempo).
- Q_2 Caudal en la segunda carga potencial (mL infiltrados / tiempo).
- H_1 Primera altura de carga potencial (5 cm).
- H_2 Segunda altura de carga potencial (15 cm).

El cálculo del factor G se halla mediante la siguiente expresión:

$$G = 0.316 \frac{d}{a} + 0.184$$

Donde:

- G Factor adimensional.
- d Profundidad del cilindro (5 cm).
- a Radio del cilindro (4,9 cm).

3.3 Campañas de infiltración

El estudio se ha realizado en base a 5 campañas de infiltrometría (tabla 2):

| Campañas ejecutadas | Duración | Ensayos realizados | |
|------------------------|-----------|--------------------|-------------|
| | | Válidos | Descartados |
| 1º - Septiembre 2016 | 2 semanas | 25 | 9 |
| 2º - Octubre 2016 | 10 días | 12 | 8 |
| 3º - Noviembre 2016 | 2 semanas | 16 | 10 |
| 4º - Noviembre 2016 | 2 semanas | 16 | 7 |
| 5º - Mayo – Junio 2017 | 2 semanas | 29 | 1 |
| | | 98 | 35 |

Tabla 2. Campañas de infiltrometría realizadas en el Pla de Sant Jordi.

Como se observa en la tabla anterior, se han realizado un total de 133 ensayos, de los cuales, 98 se consideraron válidos, y 35 fueron descartados por diversos motivos:

- ✓ Ensayos localizados en zonas poco representativas del área de estudio, muy antropizadas.
- ✓ Valores finales de K_{fs} excesivamente elevados o demasiado bajos.
- ✓ Valores finales de K_{fs} negativos. Esta circunstancia está recogida en varios trabajos ([Bagarello et al., 2009](#); [Verbist et al., 2009](#)), donde se indica que en aquellos suelos con una alta heterogeneidad y una elevada humedad inicial, pueden obtenerse resultados negativos en algunos ensayos.

La mayor parte de los ensayos descartados en las 4 primeras campañas fueron repetidos durante la quinta campaña, en la misma ubicación o en fincas adyacentes.

4. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Consideraciones previas

Dada la elevada cantidad de ensayos válidos, 98 en total, en los apartados siguientes se han clasificado los resultados según un criterio geográfico-administrativo, que facilite su posterior consulta y la futura toma de medidas de gestión (no obstante, en el último apartado se analizarán todo los resultados en su conjunto).

Así, el área de estudio del Pla de Sant Jordi se ha dividido en 6 zonas (figura 15):

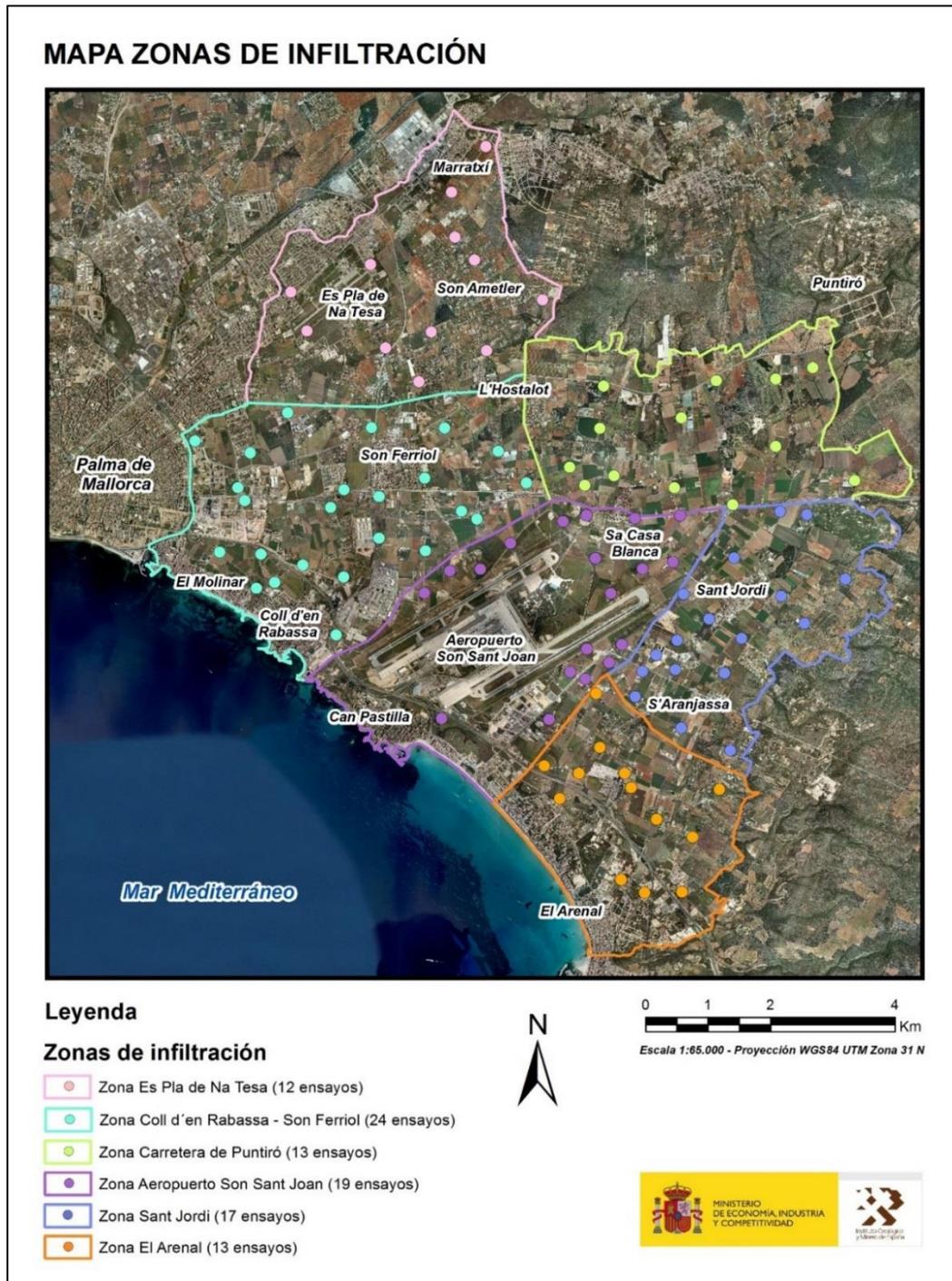


Figura 15. Delimitación de las diferentes zonas de infiltración del Pla de Sant Jordi.

En cada zona, se recogen la siguiente información:

- ✓ Datos principales de los ensayos: número, localización y uso del suelo.
- ✓ Resultados de conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) calculados después de aplicar las correcciones de Reynolds y Elrick (1990).
- ✓ A modo de referencia, un criterio simplificado de permeabilidad propuesto por Whitlow (2001) y recogido en la tabla 3:

| Grado de permeabilidad | Conductividad hidráulica saturada (cm/s) | Conductividad hidráulica saturada (mm/h) |
|-------------------------------|---|---|
| Elevada | Superior a 10^{-1} | 3600 |
| Media | $10^{-1} - 10^{-3}$ | 3600 - 36 |
| Baja | $10^{-3} - 10^{-5}$ | 36 - 0,36 |
| Muy baja | $10^{-5} - 10^{-7}$ | 0,36 - 0,0036 |
| Prácticamente impermeable | Menor de 10^{-7} | Menor de 0,0036 |

Tabla 3. Grados de permeabilidad del suelo según Whitlow (2001).

Todos los ensayos tienen asociada una ficha descriptiva, contenida en el Anexo 1.

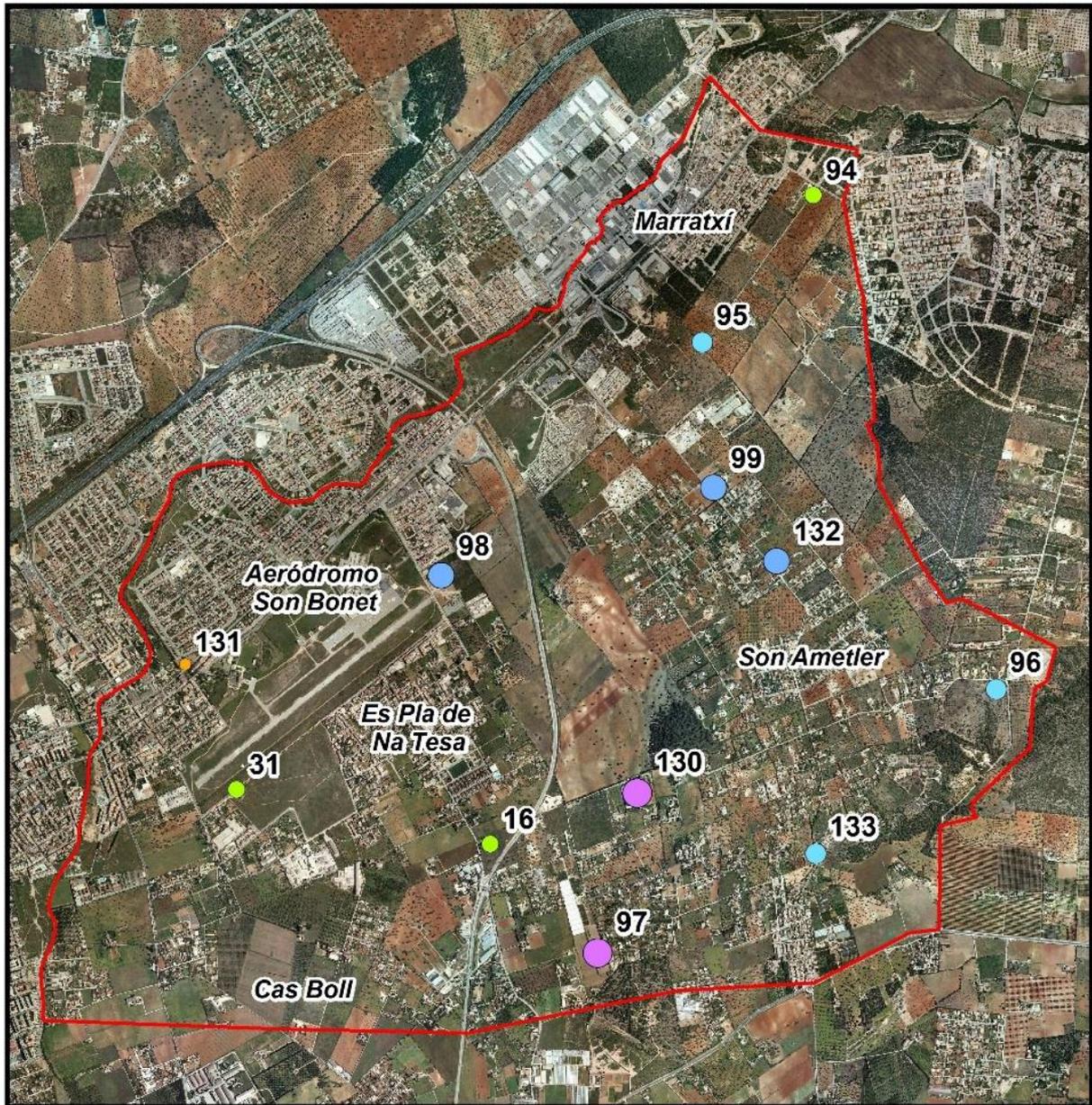
En el Anexo 2 se recogen las principales características físicas y granulométricas de cada una de las muestras de suelo recogidas y analizadas en los 98 ensayos válidos.

4.2 Zona Es Pla de Na Tesa

| Ensayo | Toponimia | Coordenadas | Uso del suelo | Kfs (mm/h) | | Media Kfs (mm/h) | K Whitlow |
|--------|-------------------|-------------------------------|---------------------|------------|-------|------------------|-----------|
| | | | | A | B | | |
| 16 | Es Pla de na Tesa | 39°35'31.4" N 2°42'46.5" E | Cultivo abandonado | 24,5 | 39,9 | 32,20 | Baja |
| 31 | Son Bonet | 39°35'40.1" N 2°41'53.7" E | Zona verde | 53,6 | 30,8 | 42,20 | Media |
| 94 | Marratxí | 39°37'17.0" N 2°43'53.6" E | Cultivo de frutales | 35,7 | 30 | 32,85 | Baja |
| 95 | Marratxí | 39°36'53.1" N 2°43'30.5" E | Cultivo de frutales | 53,2 | 52,5 | 52,85 | Media |
| 96 | Son Ametler | 39°35'56.8" N 2°44'32.0" E | Cultivo abandonado | 74,4 | 40,3 | 57,35 | Media |
| 97 | Es Pla de na Tesa | 39°35'13.7" N 2°43'09.1" E | Cultivo abandonado | 106,3 | 87,5 | 96,90 | Media |
| 98 | Es Pla de na Tesa | 39°36'15.0" N 2°42'36.2" E | Cultivo en barbecho | 78,4 | 75,5 | 76,95 | Media |
| 99 | Son Ametler | 39°36'29.4" N 2°43'33.0" E | Cultivo de frutales | 70,3 | 94,6 | 82,45 | Media |
| 130 | Es Pla de na Tesa | 39°35'39.7" N 2°43'17.2" E | Cultivo abandonado | 109,1 | 102,3 | 105,70 | Media |
| 131 | Son Bonet | 39°36'0.4" N 2°41'42.9" E | Zona verde | 11,2 | 24,8 | 18,00 | Baja |
| 132 | Son Ametler | 39°36'17.5" N 2°43'46.2" E | Cultivo en barbecho | 109,0 | 60,6 | 84,80 | Media |
| 133 | L' Hostalot | 39°35'30.0" N 2°43'54.5" E | Cultivo abandonado | 72,2 | 47,8 | 60,00 | Media |

Tabla 4. Resultados obtenidos en la zona Es Pla de Na Tesa.

MAPA INFILTRACIÓN - ES PLA DE NA TESA



Leyenda

 Limite zona Es Pla de Na Tesa

Valores medios Kfs (mm/h)

-  10,00 - 20,00
-  20,01 - 50,00
-  50,01 - 70,00
-  70,01 - 90,00
-  90,01 - 110,00



Escala 1:25.000 - Proyección WGS84 UTM Zona 31 N



Figura 16. Mapa de ensayos de infiltración en la zona Es Pla de Na Tesa.

Los valores de conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) en la zona de Es Pla de Na Tesa (figura 16 y 17) oscilan en el rango de 18 mm/h (ensayo 131) a 105,7 mm/h (ensayo 130). Según [Whitlow \(2001\)](#), los ensayos 16, 94 y 131 están clasificados con un grado de permeabilidad “bajo”.



Figura 17. Ubicación de varios ensayos de infiltración en la zona de Es Pla de Na Tesa.
A: Ensayo 31. B: Ensayo 94. C: Ensayo 99. D: Ensayo 131.

4.3 Zona Coll d'en Rabassa – Son Ferriol

| Ensayo | Toponimia | Coordenadas | Uso del suelo | Kfs (mm/h) | | Media Kfs (mm/h) | K Whitlow |
|--------|-------------------|-------------------------------|---------------------|------------|-------|------------------|-----------|
| | | | | A | B | | |
| 2 | Coll d'en Rabassa | 39°33'37.4" N 2°41'51.4" E | Cultivo de secano | 45,3 | 67,2 | 56,25 | Media |
| 3 | Coll d'en Rabassa | 39°33'28.2" N 2°41'32.6" E | Cultivo abandonado | 55,8 | 60,5 | 58,15 | Media |
| 4 | Coll d'en Rabassa | 39°33'43.2" N 2°41'23.4" E | Cultivo de secano | 29,8 | 67,2 | 48,50 | Media |
| 6 | El Molinar | 39°33'25.2" N 2°41'20.5" E | Cultivo de regadío | 9,5 | 11,2 | 10,35 | Baja |
| 7 | El Molinar | 39°33'43.9" N 2°40'55.7" E | Cultivo de regadío | 4,1 | 8,5 | 6,30 | Baja |
| 9 | Coll d'en Rabassa | 39°33'31.0" N 2°42'19.1" E | Cultivo de secano | 88,4 | 150,1 | 119,25 | Media |
| 10 | Son Malferit | 39°34'17.9" N 2°41'07.8" E | Cultivo de secano | 69,7 | 68,2 | 68,95 | Media |
| 12 | Coll d'en Rabassa | 39°34'07.6" N 2°42'09.7" E | Cultivo de secano | 106,3 | 99,2 | 102,75 | Media |
| 14 | Cas Boll | 39°34'57.4" N 2°41'41.2" E | Cultivo de secano | 105,4 | 72,6 | 89,00 | Media |
| 18 | Son Ferriol | 39°34'13.4" N 2°42'42.5" E | Cultivo abandonado | 53,7 | 54,3 | 54,00 | Media |
| 19 | Son Llätzer | 39°34'16.9" N 2°42'18.9" E | Cultivo de secano | 89,6 | 104,6 | 97,10 | Media |
| 28 | Son Malferit | 39°34'11.1" N 2°41'12.4" E | Cultivo abandonado | 21,7 | 16,3 | 19,00 | Baja |
| 29 | Son Malferit | 39°34'36.1" N 2°41'16.0" E | Cultivo de secano | 45 | 62 | 53,50 | Media |
| 30 | Son Malferit | 39°34'42.3" N 2°40'38.8" E | Zona verde | 44,2 | 22,9 | 33,55 | Baja |
| 32 | Son Ferriol | 39°34'49.6" N 2°42'37.4" E | Cultivo abandonado | 32,9 | 89,4 | 61,15 | Media |
| 33 | Son Ferriol | 39°34'05.9" N 2°43'38.0" E | Cultivo de secano | 31,3 | 39,1 | 35,20 | Baja |
| 34 | Son Ferriol | 39°34'23.2" N 2°43'13.2" E | Cultivo en barbecho | 76 | 88,5 | 82,25 | Media |
| 43 | L'Hostalot | 39°34'37.4" N 2°44'02.6" E | Cultivo de regadío | 7,8 | 22,2 | 15,00 | Baja |
| 86 | Coll d'en Rabassa | 39°33'00.9" N 2°42'14.1" E | Cultivo abandonado | 132,6 | 48,6 | 90,60 | Media |
| 87 | Son Ferriol | 39°34'49.5" N 2°43'26.5" E | Cultivo de secano | 26,7 | 45 | 35,85 | Baja |
| 112 | Son Banyà | 39°33'45.2" N 2°43'13.8" E | Cultivo abandonado | 79,6 | 72,6 | 76,10 | Media |
| 113 | Son Banyà | 39°34'01.8" N 2°43'48.3" E | Cultivo de frutales | 49,1 | 35,4 | 42,25 | Media |
| 115 | Sa Casa Blanca | 39°34'20.9" N 2°44'21.4" E | Cultivo de secano | 34,1 | 60,8 | 47,45 | Media |
| 116 | Coll d'en Rabassa | 39°33'51.7" N 2°42'42.7" E | Cultivo de frutales | 38,2 | 29,5 | 33,85 | Baja |

Tabla 5. Resultados obtenidos en la zona Coll d'en Rabassa - Son Ferriol.

MAPA INFILTRACIÓN - COLL D' EN RABASSA - SON FERRIOL



Leyenda

 Limite zona Coll d'en Rabassa - Son Ferriol

Valores medios Kfs (mm/h)

- | | |
|---|--|
|  5,00 - 10,00 |  50,01 - 70,00 |
|  10,01 - 20,00 |  70,01 - 90,00 |
|  20,01 - 30,00 |  90,01 - 120,00 |
|  30,01 - 50,00 | |



Figura 18. Mapa de ensayos de infiltración en la zona Coll d'en Rabassa - Son Ferriol.

Como puede observarse, los valores de conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) en la zona de Coll d'en Rabassa - Son Ferriol (figura 18 y 19) varían entre 6,30 mm/h, ensayo 7, y 119,25 mm/h, ensayo 9. De acuerdo con Whitlow (2001), los ensayos clasificados con un grado de permeabilidad "bajo" son ocho: 6, 7, 28, 30, 33, 43, 87 y 116.

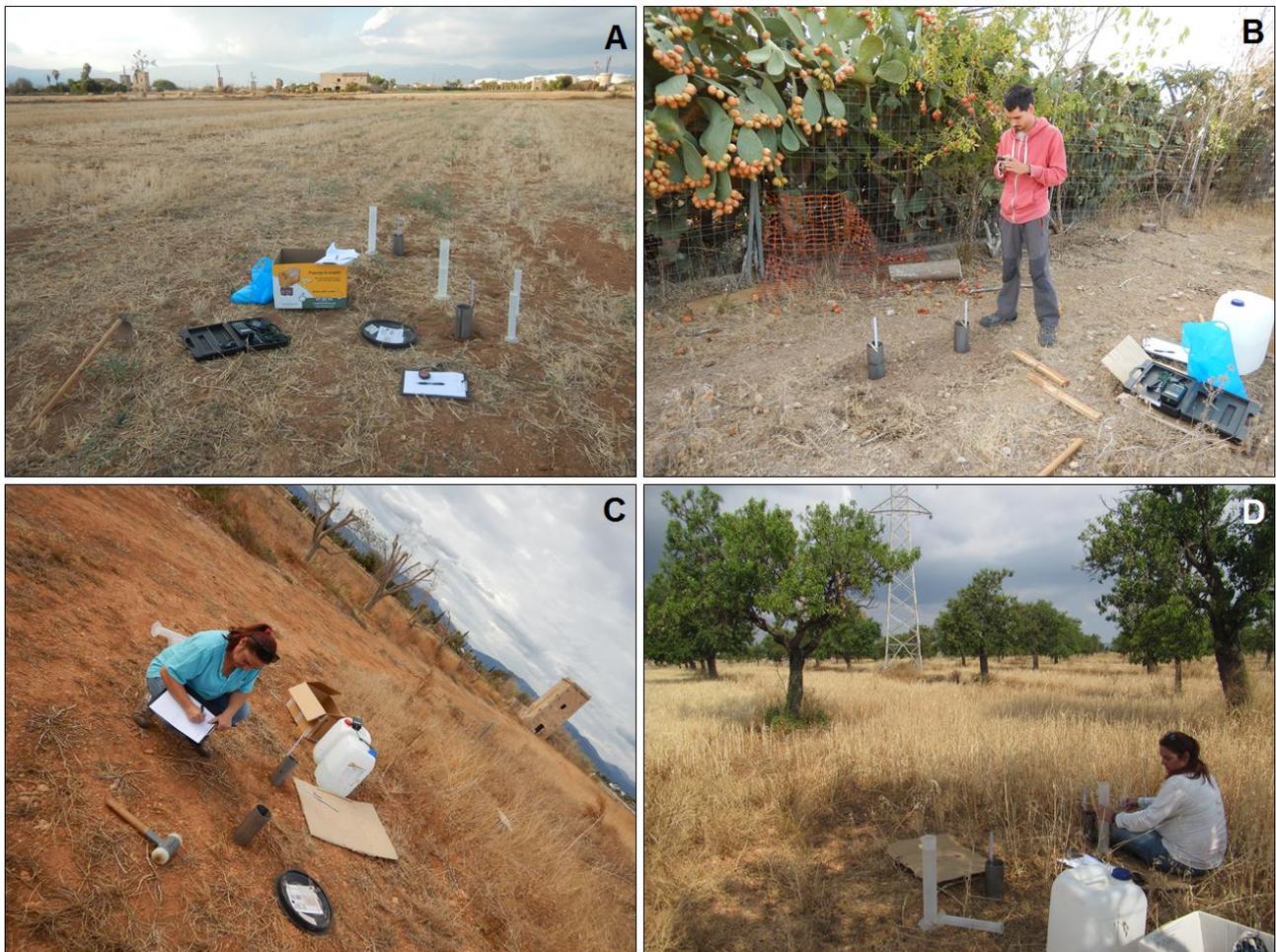


Figura 19. Ubicación de varios ensayos de infiltración en la zona de Coll d'en Rabassa – Son Ferriol. A: Ensayo 9. B: Ensayo 28. C: Ensayo 32. D: Ensayo 116.

4.4 Zona Carretera de Puntiró

| Ensayo | Toponimia | Coordenadas | Uso del suelo | Kfs (mm/h) | | Media Kfs (mm/h) | K Whitlow |
|--------|-------------------|-------------------------------|---------------------|------------|------|------------------|-----------|
| | | | | A | B | | |
| 20 | Sa Casa Blanca | 39°34'19.7" N 2°45'00.6" E | Cultivo de secano | 77,9 | 77,3 | 77,60 | Media |
| 21 | Sa Casa Blanca | 39°34'24.7" N 2°45'20.4" E | Cultivo de regadío | 32,4 | 39,6 | 36,00 | Baja |
| 44 | Ctra. Puntiró | 39°35'15.6" N 2°47'08.7" E | Zona verde | 26,4 | 18,6 | 22,50 | Baja |
| 50 | Ctra. Casa Blanca | 39°34'09.7" N 2°46'40.2" E | Cultivo de regadío | 26,1 | 19,8 | 22,95 | Baja |
| 89 | Ctra. Puntiró | 39°35'14.6" N 2°46'28.8" E | Cultivo de secano | 29,8 | 36,9 | 33,35 | Baja |
| 90 | Ctra. Puntiró | 39°34'55.2" N 2°46'05.4" E | Cultivo de secano | 38,8 | 49,1 | 43,95 | Media |
| 93 | Ctra. Casa Blanca | 39°34'18.5" N 2°46'01.0" E | Cultivo de regadío | 21,7 | 29,1 | 25,40 | Baja |
| 100 | Ctra. Puntiró | 39°34'49.6" N 2°45'10.7" E | Zona verde | 14,9 | 15,7 | 15,30 | Baja |
| 104 | Ctra. Puntiró | 39°35'11.7" N 2°45'13.3" E | Cultivo de frutales | 39,1 | 42,6 | 40,85 | Media |
| 105 | Sa Casa Blanca | 39°34'29.2" N 2°44'50.6" E | Cultivo de regadío | 80,3 | 91,4 | 85,85 | Media |
| 106 | Ctra. Casa Blanca | 39°34'40.2" N 2°47'08.8" E | Cultivo abandonado | 46,9 | 26,9 | 36,90 | Media |
| 107 | Ctra. Puntiró | 39°35'21.5" N 2°47'33.6" E | Cultivo de secano | 19,8 | 21,7 | 20,75 | Baja |
| 127 | Ctra. Casa Blanca | 39°34'22.6" N 2°48'2.0" E | Cultivo de frutales | 29,2 | 19,4 | 24,30 | Baja |

Tabla 6. Resultados obtenidos en la zona Carretera de Puntiró.

MAPA INFILTRACIÓN - CARRETERA PUNTIRÓ



Leyenda

 Limite zona Carretera Puntiró

Valores medios Kfs (mm/h)

-  10,01 - 20,00
-  20,01 - 30,00
-  30,01 - 50,00
-  50,01 - 70,00
-  70,01 - 90,00



0 0,5 1 2 Km

Escala 1:30.000 - Proyección WGS84 UTM Zona 31 N



Figura 20. Mapa de ensayos de infiltración en la zona Carretera de Puntiró.

Los ensayos localizados en la zona de la carretera de Puntiró (figura 20 y 21), los valores de conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) oscilan entre 15,30 mm/h, (ensayo 100), y 85,85 mm/h, (ensayo 105). Según Whitlow (2001), los ensayos 21, 44, 50, 89, 93, 100, 107 y 127 están clasificados con un grado de permeabilidad “bajo”.



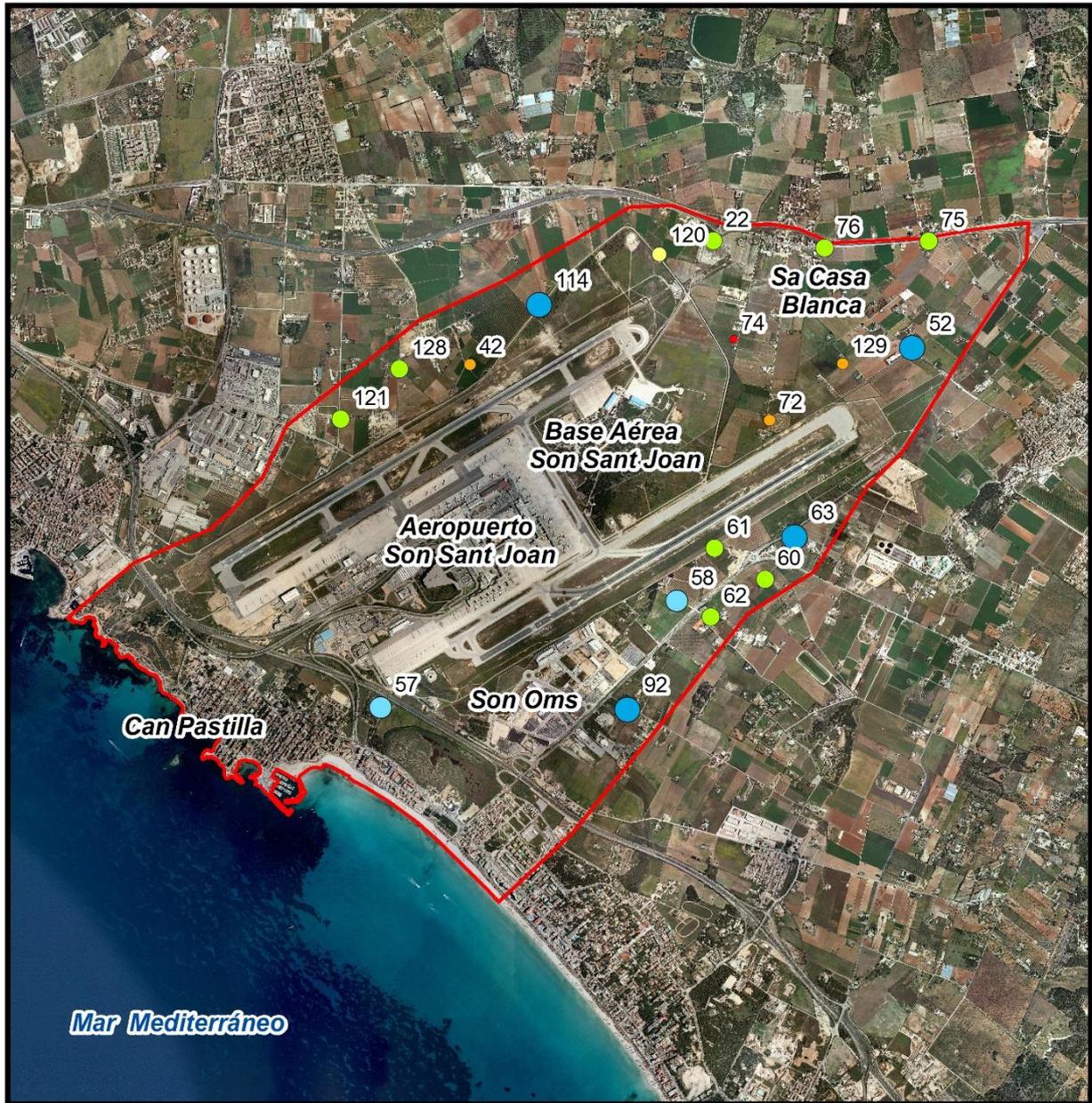
Figura 21. Ubicación de varios ensayos de infiltración en la zona de la carretera de Puntiró.
A: Ensayo 90. B: Ensayo 100. C: Ensayo 105. D: Ensayo 127.

4.5 Zona Aeropuerto Son Sant Joan

| Ensayo | Toponimia | Coordenadas | Uso del suelo | Kfs (mm/h) | | Media Kfs (mm/h) | K Whitlow |
|--------|-------------------|-------------------------------|--------------------|------------|------|------------------|-----------|
| | | | | A | B | | |
| 22 | Sa Casa Blanca | 39°34'04.3" N 2°45'02.1" E | Cultivo abandonado | 40,9 | 31,1 | 36,00 | Baja |
| 42 | Son Banya | 39°33'35.7" N 2°43'50.8" E | Cultivo de regadío | 20,2 | 18,1 | 19,15 | Baja |
| 52 | Sa Casa Blanca | 39°33'39.6" N 2°46'00.1" E | Cultivo de regadío | 93,5 | 59,5 | 76,50 | Media |
| 57 | Can Pastilla | 39°32'17.3" N 2°43'25.0" E | Cultivo abandonado | 88,3 | 28,8 | 58,55 | Media |
| 58 | S'Aranjassa | 39°32'41.8" N 2°44'51.4" E | Cultivo de secano | 53,3 | 61,6 | 57,45 | Media |
| 60 | S'Aranjassa | 39°32'46.8" N 2°45'17.3" E | Cultivo barbecho | 40,3 | 27,9 | 34,10 | Baja |
| 61 | S'Aranjassa | 39°32'53.9" N 2°45'02.5" E | Cultivo abandonado | 47 | 37,4 | 42,20 | Media |
| 62 | S'Aranjassa | 39°32'38.3" N 2°45'01.5" E | Cultivo de regadío | 69,5 | 14,9 | 42,20 | Media |
| 63 | S'Aranjassa | 39°32'56.4" N 2°45'25.9" E | Cultivo barbecho | 114,1 | 63,6 | 88,85 | Media |
| 72 | Sa Casa Blanca | 39°33'23.1" N 2°45'18.5" E | Zona verde | 13,4 | 14 | 13,70 | Baja |
| 74 | Sa Casa Blanca | 39°33'41.5" N 2°45'07.9" E | Cultivo barbecho | 5,3 | 6,2 | 5,75 | Baja |
| 75 | Ctra. Casa Blanca | 39°34'04.0" N 2°46'04.9" E | Cultivo de regadío | 63,6 | 30,7 | 47,15 | Media |
| 76 | Sa Casa Blanca | 39°34'02.4" N 2°45'34.4" E | Cultivo de regadío | 41 | 31 | 36,00 | Baja |
| 92 | Son Olms | 39°32'17.0" N 2°44'37.2" E | Cultivo abandonado | 73,4 | 71,6 | 72,50 | Media |
| 114 | Son Banya | 39°33'49.2" N 2°44'11.0" E | Cultivo de secano | 90,8 | 84,3 | 87,55 | Media |
| 120 | Sa Casa Blanca | 39°34'0.8" N 2°44'46.2" E | Cultivo de regadío | 27,8 | 23,5 | 25,65 | Baja |
| 121 | Son Banya | 39°33'23.1" N 2°43'13.1" E | Cultivo de regadío | 28,5 | 62,5 | 45,50 | Media |
| 128 | Son Banya | 39°33'34.6" N 2°43'30.2" E | Cultivo de regadío | 39,3 | 37,7 | 38,50 | Media |
| 129 | Sa Casa Blanca | 39°33'36.0" N 2°45'39.7" E | Cultivo abandonado | 22,7 | 9,8 | 16,25 | Baja |

Tabla 7. Resultados obtenidos en la zona Aeropuerto Son Sant Joan.

MAPA INFILTRACIÓN - AEROPUERTO SON SANT JOAN



Leyenda

 Limite zona Aeropuerto Son Sant Joan

Valores medios Kfs (mm/h)

- | | |
|---|---|
|  5,00 - 10,00 |  30,01 - 50,00 |
|  10,01 - 20,00 |  50,01 - 70,00 |
|  20,01 - 30,00 |  70,01 - 90,00 |



Escala 1:35.000 - Proyección WGS84 UTM Zona 31 N



Figura 22. Mapa de ensayos de infiltración en la zona Aeropuerto Son Sant Joan.

En la zona del aeropuerto Son Sant Joan (figura 22 y 23), los valores de conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) oscilan entre 5,75 mm/h, (ensayo 74), y 88,85 mm/h, (ensayo 63). Según Whitlow (2001), los ensayos clasificados con un grado de permeabilidad “bajo” son el 22, 42, 60, 72, 74, 76, 120 y 129.

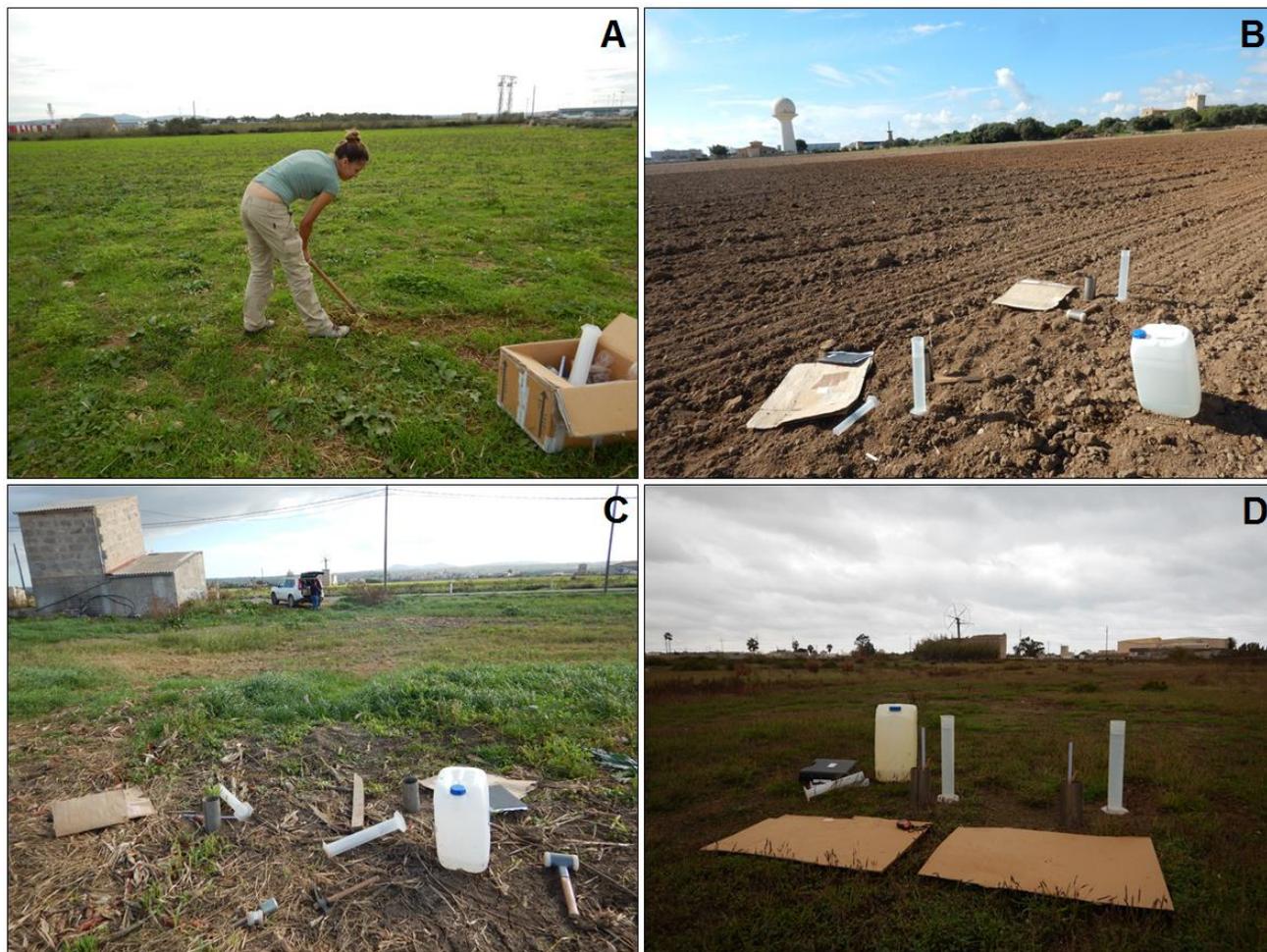


Figura 23. Ubicación de varios ensayos de infiltración en la zona del aeropuerto Son Sant Joan.
A: Ensayo 42. B: Ensayo 58. C: Ensayo 74. D: Ensayo 92.

4.6 Zona Sant Jordi

| Ensayo | Toponimia | Coordenadas | Uso del suelo | Kfs (mm/h) | | Media Kfs (mm/h) | K Whitlow |
|--------|-------------------|-------------------------------|---------------------|------------|------|------------------|-----------|
| | | | | A | B | | |
| 23 | Sant Jordi | 39°33'22.9" N 2°46'07.3" E | Cultivo en barbecho | 40,8 | 45,5 | 43,15 | Media |
| 24 | Sant Jordi | 39°33'09.8" N 2°46'24.4" E | Cultivo en barbecho | 21,9 | 19,8 | 20,85 | Baja |
| 49 | Ctra. Casa Blanca | 39°34'04.7" N 2°47'29.9" E | Cultivo en barbecho | 44,4 | 49,6 | 47,00 | Media |
| 54 | Sant Jordi | 39°32'59.7" N 2°46'45.0" E | Cultivo de secano | 30,8 | 47 | 38,90 | Media |
| 64 | S'Aranjassa | 39°32'29.1" N 2°45'34.9" E | Cultivo de regadío | 30,5 | 38,4 | 34,45 | Baja |
| 67 | S'Aranjassa | 39°32'58.6" N 2°46'03.1" E | Cultivo abandonado | 4,1 | 10,7 | 7,40 | Baja |
| 68 | S'Aranjassa | 39°32'43.3" N 2°46'01.9" E | Cultivo de secano | 60,5 | 54,6 | 57,55 | Media |
| 70 | S'Aranjassa | 39°32'50.8" N 2°45'48.9" E | Cultivo abandonado | 26 | 14,1 | 20,05 | Baja |
| 82 | Sant Jordi | 39°33'21.9" N 2°47'12.8" E | Cultivo de regadío | 54,3 | 57,7 | 56,00 | Media |
| 83 | Sant Jordi | 39°33'41.9" N 2°46'41.2" E | Cultivo de regadío | 37,2 | 45,5 | 41,35 | Media |
| 84 | Ctra. Casa Blanca | 39°34'06.2" N 2°47'12.0" E | Cultivo de secano | 61,1 | 70,3 | 65,70 | Media |
| 108 | Sant Jordi | 39°33'7.6" N 2°47'28.5" E | Cultivo de frutales | 95,5 | 64,8 | 80,15 | Media |
| 109 | Sant Jordi | 39°33'30.9" N 2°47'56.0" E | Cultivo abandonado | 48,2 | 55,1 | 51,65 | Media |
| 117 | S'Aranjassa | 39°32'1.0" N 2°46'39.0" E | Cultivo de secano | 29,2 | 45,5 | 37,35 | Media |
| 118 | S'Aranjassa | 39°32'12.7" N 2°46'5.9" E | Cultivo de secano | 30,4 | 47,7 | 39,05 | Media |
| 119 | S'Aranjassa | 39°32'41.5" N 2°46'35.0" E | Cultivo abandonado | 9,6 | 18,6 | 14,10 | Baja |
| 126 | S'Aranjassa | 39°32'42.3" N 2°45'39.7" E | Cultivo abandonado | 29,8 | 20,5 | 25,15 | Baja |

Tabla 8. Resultados obtenidos en la zona Sant Jordi.

MAPA INFILTRACIÓN - SANT JORDI



Leyenda

 Limite zona Sant Jordi

Valores medios Kfs (mm/h)

- | | |
|---|---|
|  5,00 - 10,00 |  30,01 - 50,00 |
|  10,01 - 20,00 |  50,01 - 70,00 |
|  20,01 - 30,00 |  70,01 - 90,00 |



Escala 1:25.000 - Proyección WGS84 UTM Zona 31 N



Figura 24. Mapa de ensayos de infiltración en la zona Sant Jordi.

Los valores de conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) en la zona de Sant Jordi (figura 24 y 25) varían en el rango de 7,40 mm/h, ensayo 67, y el máximo de 80,15 mm/h medido el ensayo 108. Según Whitlow (2001), los ensayos 24, 64, 67, 70, 119 y 126 están clasificados con un grado de permeabilidad “bajo”.

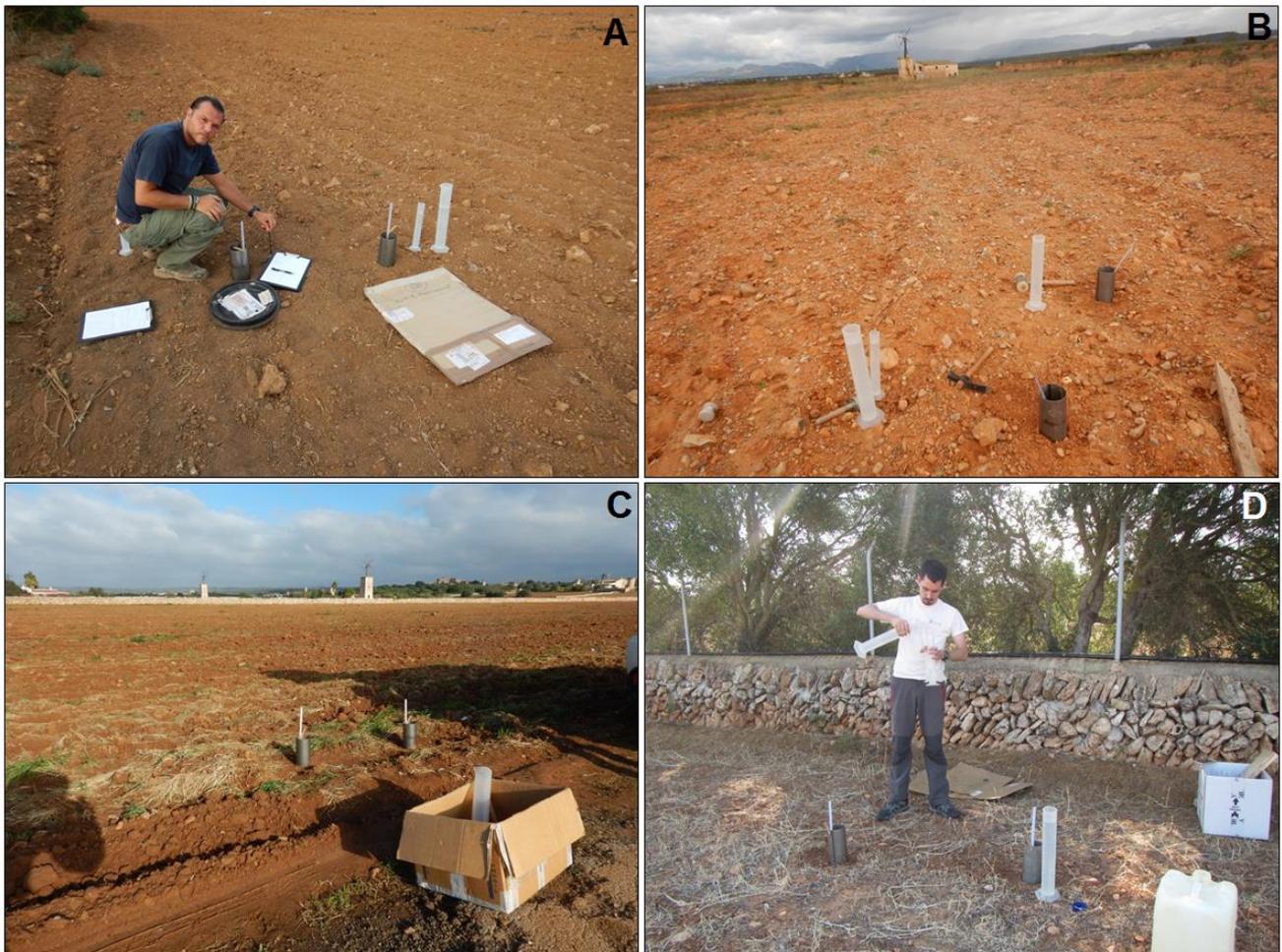


Figura 23. Ubicación de varios ensayos de infiltración en la zona de Sant Jordi.
A: Ensayo 23. B: Ensayo 70. C: Ensayo 83. D: Ensayo 117.

4.7 Zona El Arenal

| Ensayo | Toponimia | Coordenadas | Uso del suelo | Kfs (mm/h) | | Media Kfs (mm/h) | K Whitlow |
|--------|-------------|-------------------------------|---------------------|------------|-------|------------------|-----------|
| | | | | A | B | | |
| 27 | Es Pil-larí | 39°31'52.6" N 2°44'34.0" E | Cultivo en barbecho | 50 | 67 | 58,50 | Media |
| 35 | Es Pil-lari | 39°31'48.8" N 2°44'57.4" E | Cultivo de secano | 43,4 | 24,8 | 34,10 | Baja |
| 36 | Es Pil-lari | 39°31'48.8" N 2°45'28.0" E | Cultivo abandonado | 80,3 | 74,4 | 77,35 | Media |
| 37 | Es Pil-lari | 39°31'41.4" N 2°45'32.3" E | Cultivo de secano | 10,8 | 35 | 22,90 | Baja |
| 38 | El Arenal | 39°30'46.9" N 2°46'06.8" E | Cultivo de frutales | 77,5 | 116,5 | 97,00 | Media |
| 39 | Es Pil-lari | 39°31'24.9" N 2°45'49.4" E | Cultivo de frutales | 79,2 | 42,4 | 60,80 | Media |
| 56 | Es Pil-lari | 39°32'02.4" N 2°45'11.3" E | Cultivo de frutales | 20,7 | 67,4 | 44,05 | Media |
| 59 | S'Aranjassa | 39°32'30.6" N 2°45'08.7" E | Cultivo de regadío | 84 | 125,1 | 104,55 | Media |
| 111 | El Arenal | 39°31'35.6" N 2°44'44.4" E | Cultivo de secano | 53,1 | 29,5 | 41,30 | Media |
| 122 | El Arenal | 39°30'53.1" N 2°45'25.9" E | Cultivo abandonado | 48,4 | 81,4 | 64,90 | Media |
| 123 | El Arenal | 39°30'46.4" N 2°45'41.5" E | Cultivo abandonado | 92,0 | 147,1 | 119,55 | Media |
| 124 | Es Pil-larí | 39°31'15.6" N 2°46'13.7" E | Cultivo de secano | 36,1 | 86,4 | 61,25 | Media |
| 125 | Es Pil-larí | 39°31'40.6" N 2°46'31.6" E | Cultivo abandonado | 121,9 | 90,5 | 106,20 | Media |

Tabla 9. Resultados obtenidos en la zona El Arenal.

MAPA INFILTRACIÓN - EL ARENAL



Leyenda

Limite zona El Arenal

Valores medios Kfs (mm/h)

- 20,01 - 30,00
- 30,01 - 50,00
- 50,01 - 70,00
- 70,01 - 90,00
- 90,01 - 110,00



Escala 1:25.000 - Proyección WGS84 UTM Zona 31 N



Figura 26. Mapa de ensayos de infiltración en la zona El Arenal.

En los ensayos de la zona del Arenal, (figura 26 y 27) los valores de conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) varían entre 22,90 mm/h, ensayo 37, y 119,55 mm/h, ensayo 123. Según Whitlow (2001), los ensayos clasificados con un grado de permeabilidad “bajo” son el 35 y el 37.

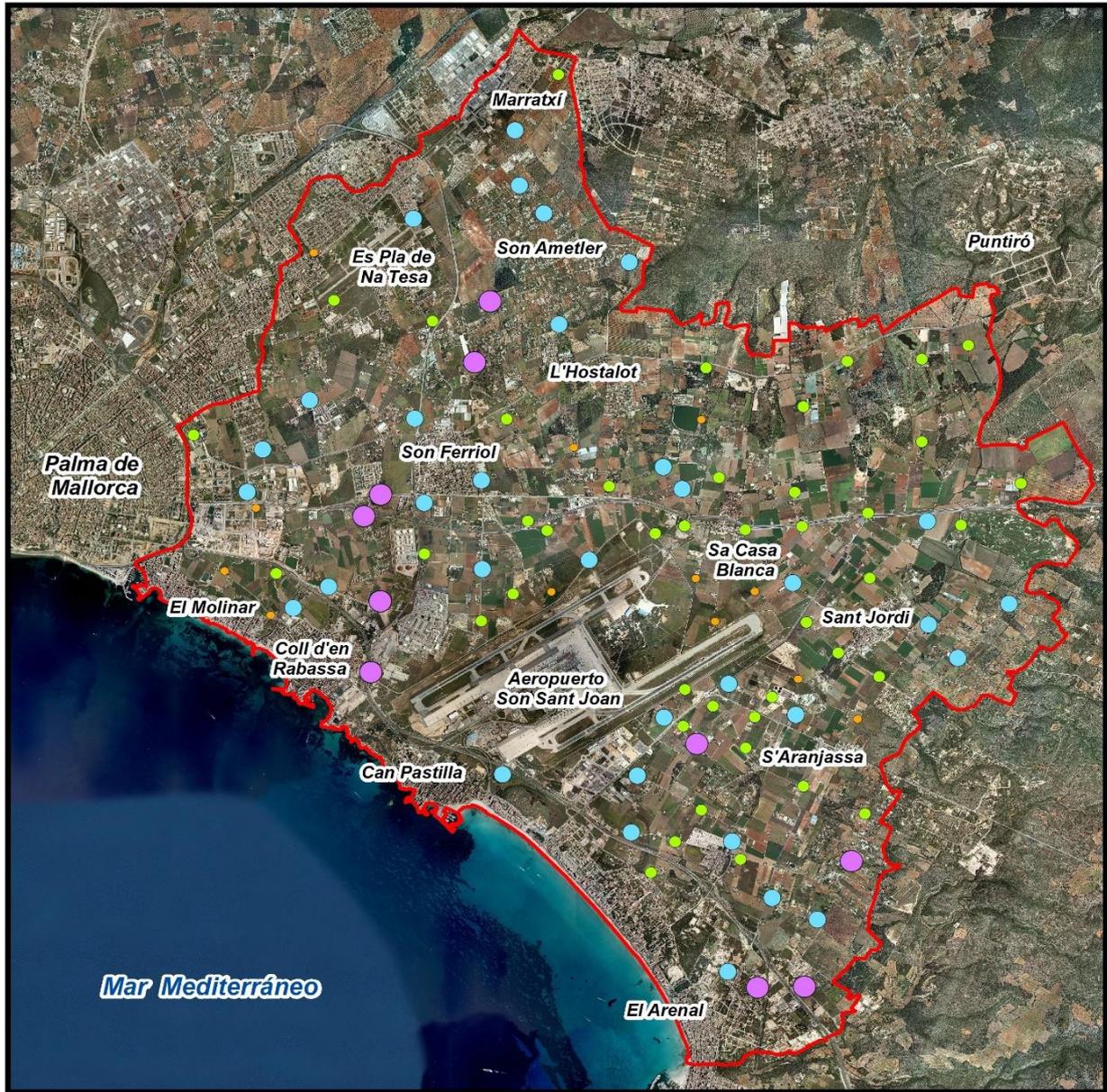


Figura 25. Ubicación de varios ensayos de infiltración en la zona del Arenal.
A: Ensayo 27. B: Ensayo 39. C: Ensayo 59. D: Ensayo 123.

4.7 Zona general del Pla de Sant Jordi

A continuación se muestra un mapa general de conductividad hidráulica saturada (figura 28) en donde se han agrupado las seis zonas y simplificado los valores de Kfs en 4 rangos principales.

MAPA DE RESULTADOS ENSAYOS DE INFILTRACIÓN



Leyenda

 Limite zona de estudio

Valores medios Kfs (mm/h)

-  5,00 - 20,00
-  20,01 - 50,00
-  50,01 - 90,00
-  90,01 - 120,00



Escala 1:65.000 - Proyección WGS84 UTM Zona 31 N



Figura 28. Mapa general de ensayos de infiltración en el área de estudio del Pla de Sant Jordi.

Los valores de conductividad hidráulica saturada (Kfs) varían entre 5,75 y 119,55 mm/h, medidos en los ensayos 74 y 123 respectivamente. Hay que hacer notar que esta diferencia es relativamente elevada, aunque dentro de los valores esperados en suelos que han sufrido presión antrópica, donde la acción del hombre (manejo agrícola, extracción de sedimentos, rellenos, etc) impide el proceso natural de asentamiento y estabilización de la estructura del suelo.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto una menor conductividad hidráulica saturada localizada al noreste del aeropuerto Son Sant Joan, entre los núcleos urbanos de Sant Jordi y Sa Casa Blanca. En esta área se encuentran los ensayos 24, 67, 70, 72, 74, 126 y 129; ninguno de ellos supera los 25,5 mm/h. Otra zona con baja conductividad hidráulica saturada, en los que los valores de Kfs son menores de 20 mm/h, se localiza en la zona del Molinar y Son Malferit (ensayos 6, 7 y 28). Según Whitlow (2001), 35 ensayos de 98 totales (aproximadamente un tercio) están clasificados con un grado de permeabilidad “bajo”, cuyo límite se sitúa en 36 mm/h. En base a ello, las áreas anteriores (noreste del aeropuerto Son Sant Joan y el Molinar - Son Malferit), junto con varios puntos de la carretera de Puntiró y S’Aranjassa, son las zonas que concentran una menor conductividad hidráulica saturada.

Por otro lado, las zonas en las que se ha obtenido una mayor Kfs se localizan en los alrededores de Son Llàtzer - Son Ferriol (ensayos 12, 14, 19, 34 y 112), Son Ametler (ensayos 97, 99 y 130 y 132) zona norte de Coll d’en Rabassa (ensayos 9 y 86) y sureste de El Arenal (ensayos 38, 123 y 125).

El histograma de frecuencias de los valores de Kfs se muestra en la figura 29. Se observa una forma acampanada, similar a una distribución normal, pero ligeramente desplazada hacia los valores menores de Kfs. Esto indica que en la zona de estudio predominan aquellos ensayos con una conductividad hidráulica saturada menor o igual a 60 mm/h (68 frente a 30).

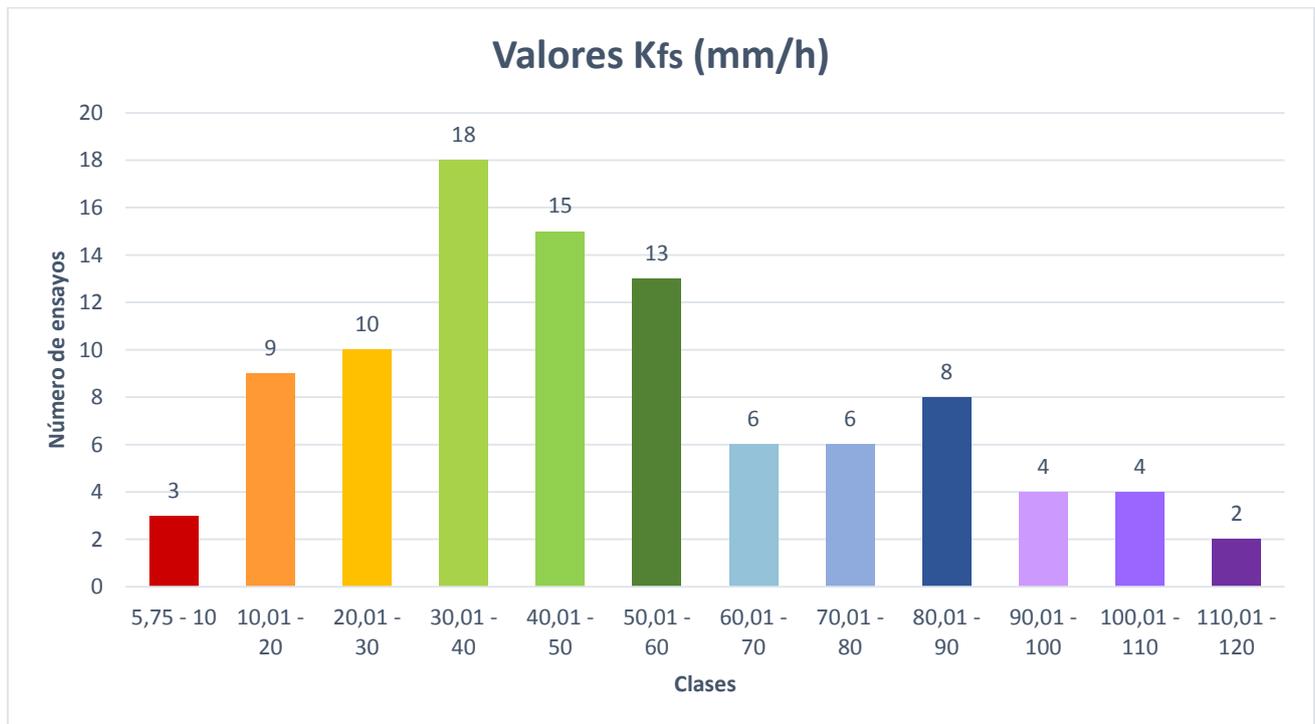


Figura 29. Histograma de frecuencias de los valores de Kfs en el área de estudio del Pla de Sant Jordi.

4.8 Análisis geoestadístico

La geoestadística es un conjunto de técnicas empleadas para analizar y predecir valores de una propiedad distribuida en espacio o tiempo (Samper y Carrera, 1990). En contraposición con la estadística clásica o convencional, tales valores no se consideran independientes; por el contrario, se supone de manera implícita que están correlacionados unos con otros, es decir, que existe una dependencia espacial.

Intuitivamente esto indica que, mientras más cercanos estén situados dos puntos, más correlacionados estarán, mientras que si están más separados, menos relación existirá entre ellos.

- Variograma:

La función básica que describe la variabilidad espacial de un fenómeno de interés se conoce como variograma. El variograma es la representación gráfica de todas las semivarianzas encontradas entre todos los pares de ensayos (repeticiones A y B) separados por intervalos de distancia (Samper y Carrera, 1990):

$$\gamma(h) = \frac{N(h)}{2} \sum [Z_x - Z_{x+h}]^2$$

Donde:

- $\gamma(h)$ Semivarianza para todas los ensayos localizados en la zona de estudio, separados por una distancia h .
- $N(h)$ Número de pares de ensayos (repeticiones A y B) separados por una distancia h .
- Z_x Valor del ensayo en una localización x
- Z_{x+h} Valor del ensayo a la distancia del intervalo h desde x

Estos valores de semivarianza se representan, en función de la distancia que separa los ensayos, con puntos en la figura 30. Se puede observar que la semivarianza aumenta a medida que aumenta la distancia que separa los ensayos hasta que se llega a un intervalo de distancia, de unos 1000 m, a partir del cual la semivarianza no aumenta significativamente estabilizándose en torno a 900 (mm/h)².

Esta distancia a partir de la cual el variograma se estabiliza, indica que a partir de 1000 m los ensayos son espacialmente independientes unos de otros. El valor del variograma en torno al origen, de unos 314 (mm/h)², indica la variabilidad a escalas pequeñas. Este valor es muy grande comparado con la variabilidad total de la muestra (873 mm/h)².

Se calcularon también variogramas direccionales no encontrando una anisotropía importante.

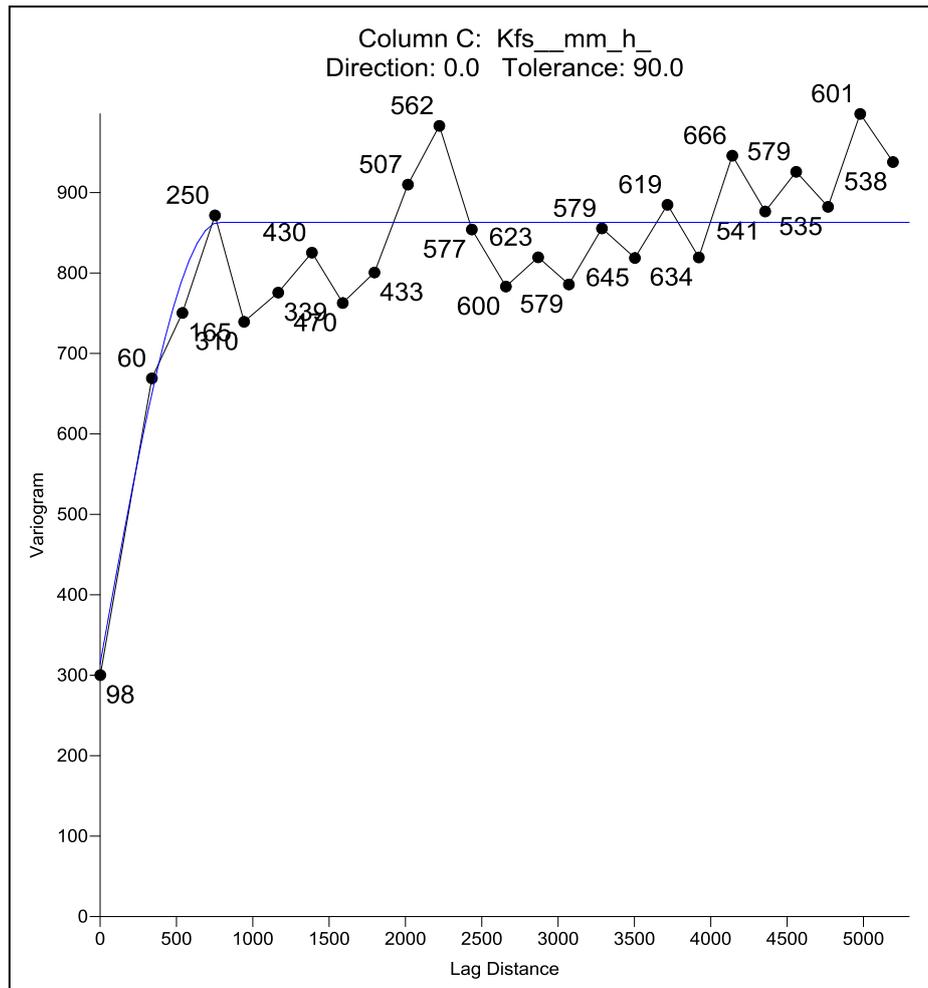


Figura 30. Variograma omnidireccional experimental (puntos) y modelado (línea azul).

Es necesario ajustar una función a estos puntos del variograma experimental para cuantificar el grado y escala de la variación espacial. El ajuste a una función permite extraer una serie de parámetros que son los que van a ser usados para la interpolación Geoestadística (Chica-Olmo *et al.*, 1995).

La función ajustada viene representada en la figura 2 por una línea azul; y el tipo de variograma empleado para el ajuste es, en este caso, esférico, de meseta 549 (mm/h)² y alcance 971 m.

- **Interpolación de las permeabilidades con kriging:**

Los valores de permeabilidad en la zona de estudio se han calculado con la técnica de interpolación denominada kriging simple (Samper y Carrera, 1990). El tamaño de pixel del mapa resultante es de 100 x 100 m (figura 31):

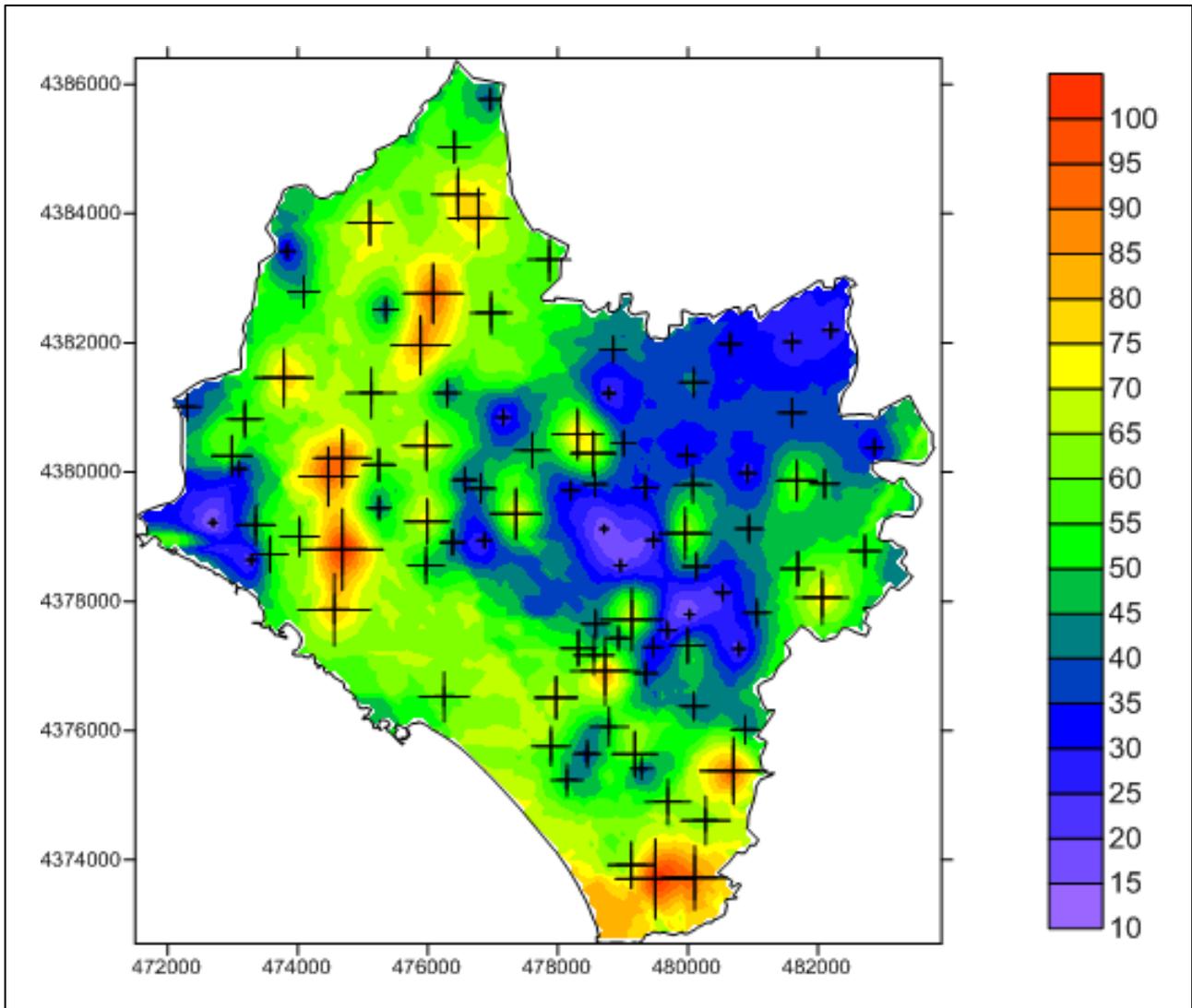
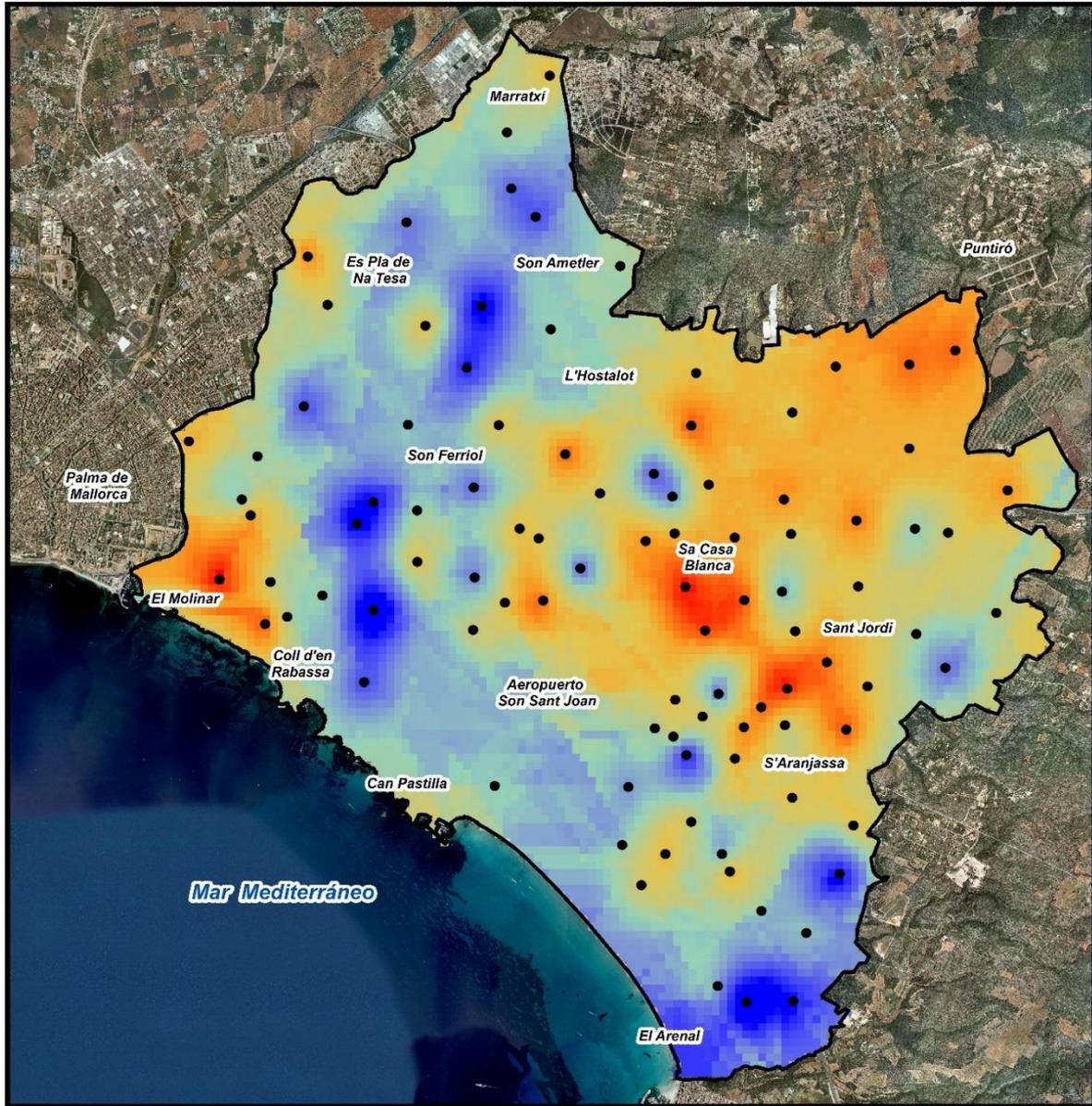


Figura 31. Resultado de la interpolación de los ensayos con kriging simple. La barra lateral representa los diferentes intervalos de conductividad hidráulica saturada (Kfs) en mm/h en la zona de estudio.

Adicionalmente, se ha representado esta interpolación con ArcGIS en la figura 32A y 32B y se ha comparado con una representación de la inversa de la distancia al cuadrado, realizada también con ArcGIS (figura 32C). Comparando las figuras A y C, se pueden observar notables similitudes entre ambas técnicas, kriging simple e inversa de la distancia al cuadrado, para representar la conductividad hidráulica saturada en la zona de estudio.

MAPA DE PERMEABILIDAD



Leyenda

-  Limite zona de estudio
-  Ensayos válidos

Valor Kfs (mm/h)

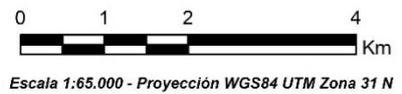
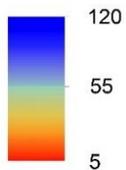
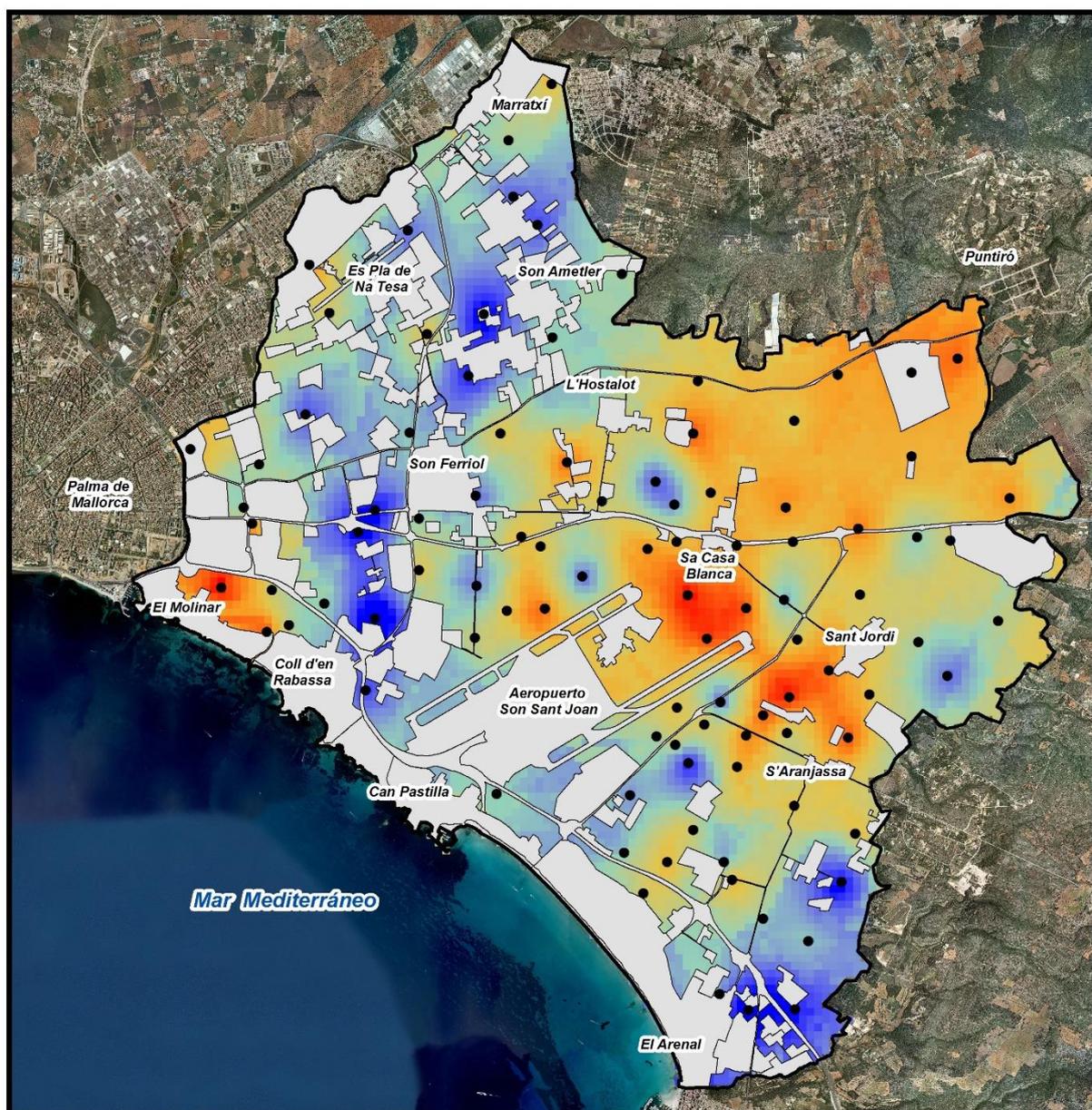


Figura 32A. Mapa de permeabilidad de la zona de estudio del Pla de Sant Jordi creado a partir de **kriging simple** en ArcGIS.

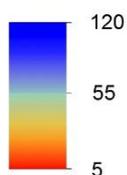
MAPA DE PERMEABILIDAD Y USOS DEL SUELO



Leyenda

-  Limite zona de estudio
-  Ensayos válidos
-  Usos del suelo

Valor Kfs (mm/h)

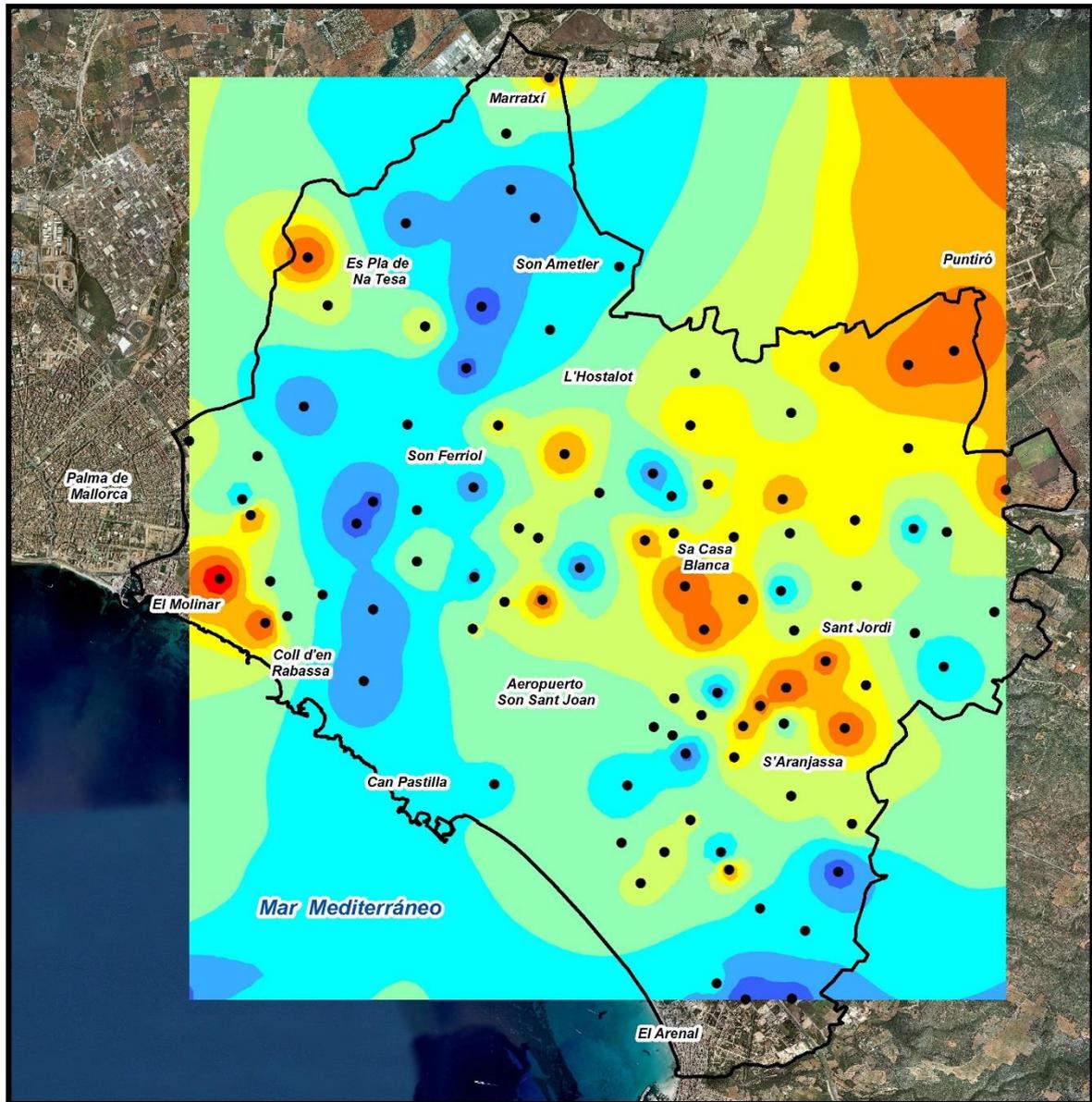


Escala 1:65.000 - Proyección WGS84 UTM Zona 31 N



Figura 32B. Mapa de permeabilidad de la zona de estudio del Pla de Sant Jordi. Incluye los diferentes usos del suelo de la figura 7, exceptuando el uso agrícola.

MAPA DE PERMEABILIDAD



Leyenda

□ Limite zona de estudio

● Ensayos válidos

Valor Kfs (mm/h)

| | |
|---------|-----------|
| 5 – 17 | 47 – 57 |
| 17 – 27 | 57 – 70 |
| 27 – 35 | 70 – 90 |
| 35 – 40 | 90 – 110 |
| 40 – 47 | 110 – 120 |



0 1 2 4 Km

Escala 1:65.000 - Proyección WGS84 UTM Zona 31 N



Figura 32C. Mapa de permeabilidad de la zona de estudio del Pla de Sant Jordi creado a partir de la herramienta de la **inversa de la distancia al cuadrado** en ArcGIS.

- Validación cruzada:

Para verificar la calidad del mapa interpolado se ha utilizado el método de validación cruzada.

Este método consiste en la estimación del valor de la variable que se va a interpolar, con el kriging y el variograma modelado, en cada uno de los puntos en los que se ha realizado un ensayo pero sin incluir dicho valor. De esta forma se conoce para cada punto el valor real obtenido del ensayo y el valor estimado. Con estos dos valores en cada punto puede realizarse un análisis estadístico de los errores.

El método de interpolación será mejor si el conjunto de los errores tiene las siguientes características:

1. La media de los errores y la media cuadrática es próxima a cero.
2. Los valores de error deben ser independientes de su localización en el espacio y no deben estar auto-correlacionados.
3. La función de distribución de los errores debe aproximarse a la distribución normal.

Los valores de los estadísticos de los errores están reflejados en la tabla 10.

| | K estimada | Error | Número datos usados |
|--------------------------|---------------|-----------------------|---------------------|
| Cuantiles | | | |
| 1%-til: | 17.7699682535 | -70.2911602162 | 13 |
| 5%-til: | 22.5664228277 | -44.7175487508 | 14 |
| 10%-til: | 27.4781153041 | -28.694758767 | 15 |
| 25%-til: | 35.7288811559 | -11.6633928519 | 19 |
| 50%-til: | 46.7456882178 | 2.85422890044 | 20 |
| 75%-til: | 65.557496116 | 14.0290205787 | 20 |
| 90%-til: | 80.4689025985 | 24.2451739485 | 20 |
| 95%-til: | 89.6303030187 | 30.884471396 | 20 |
| 99%-til: | 108.256887793 | 51.3856155863 | 20 |
| Mínimo: | 16.2626506469 | -82.2038659521 | 13 |
| Máximo: | 119.738003174 | 59.6568877935 | 20 |
| Media: | 50.9508395351 | 0.130431371798 | 18.8724489796 |
| Mediana: | 46.8027359134 | 2.98433677822 | 20 |
| Media cuadrática: | 55.0823756485 | 22.426876645 | 18.9802528961 |
| Varianza: | 440.326622158 | 505.527003112 | 4.10159602302 |
| Desviación estándar: | 20.9839610693 | 22.483927662 | 2.02523974458 |
| Rango intercuartil: | 29.8286149601 | 25.6924134307 | 1 |
| Rango: | 103.475352527 | 141.860753746 | 7 |

Tabla 10. Estadísticos de los errores obtenidos en la validación cruzada.

Como puede observarse, la media de los errores es muy cercana a cero, pero la media cuadrática no lo es. Esto se debe a la gran variabilidad de los valores de los ensayos a pequeñas distancias, con un rango comprendido entre -82.2 y 59.6 mm/h. Además, este rango es similar al de las diferencias obtenidas entre las repeticiones (A y B) realizadas por cada ensayo (entre -61.7 y 84 mm/h).

Por último, se ha realizado un gráfico de dispersión (figura 33), mostrando los valores medidos (eje

X) frente a los valores estimados (eje Y). El ajuste lineal que se puede realizar a estos puntos tiene un valor de R^2 de 0.45, corroborando de nuevo que los errores contenidos en el mapa de permeabilidad se deben fundamentalmente a la gran variabilidad de valores a pequeña escala.

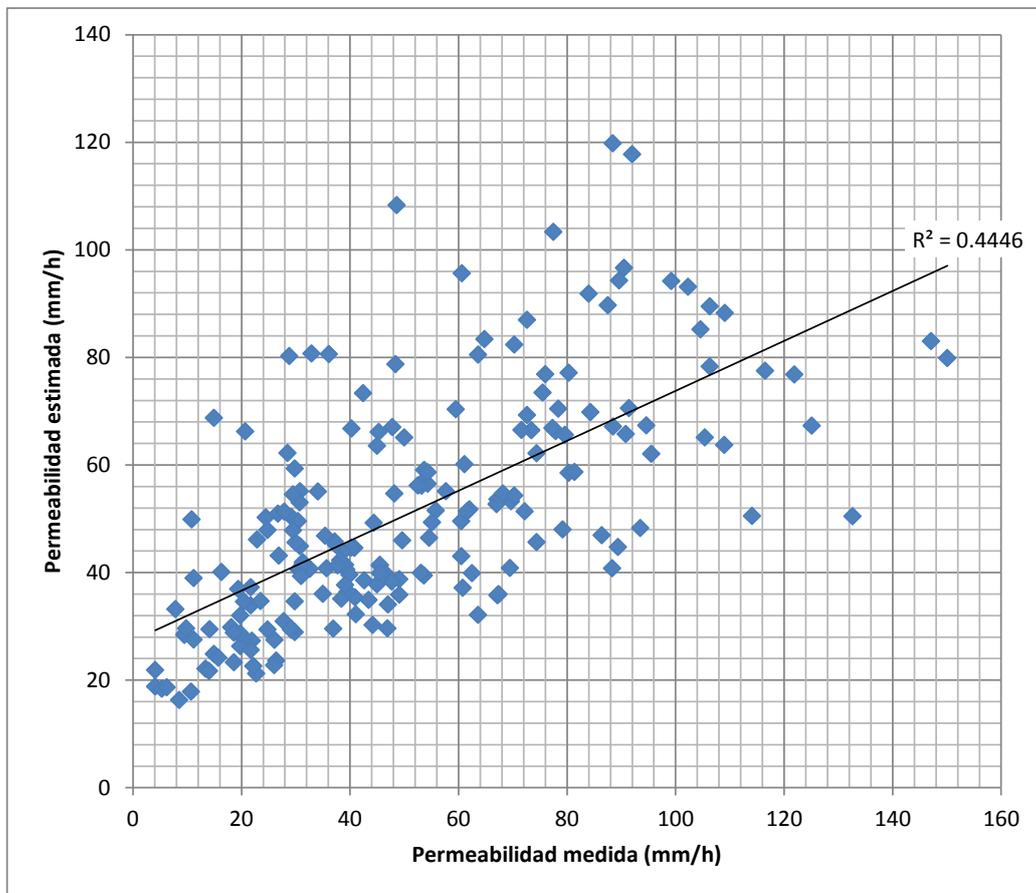


Figura 33. Diagrama de dispersión de los valores medidos (eje X) frente a los valores estimados por kriging (eje Y). Se incluye la recta que se ajustaría a los puntos por mínimos cuadrados y el valor del coeficiente R^2 .

4.9 Mejora de la estimación de Kfs

Como se ha comentado en el apartado anterior, la precisión de la interpolación espacial de la Kfs obtenida mediante el kriging está condicionada por la gran variabilidad a pequeña escala que presenta este parámetro. Con el fin de apoyar la información del mapa obtenido se ha procedido a realizar estimaciones complementarias de Kfs a partir de diferentes métodos, los cuales se describen a continuación y en los que se han empleado los datos de la repetición A.

En los análisis de la primera sección, correspondientes a las funciones de edafo-transferencia, se han utilizado los programas Excel y Rosetta, mientras que en las siguientes secciones se ha empleado [RStudio \(2016\)](#).

- Funciones de edafo-transferencia:

Las funciones de edafo-transferencia (FET) son modelos matemáticos que se basan en emplear propiedades del suelo conocidas, medidas in situ o en el laboratorio, para estimar otras propiedades de difícil medición ([Pachepsky et al., 2006](#)). La mayoría de las FET validadas han sido diseñadas para estimar la conductividad hidráulica e infiltración en los suelos ([Sobieraj et al., 2001](#); [Nemes et al., 2005](#)) y son una opción rápida y de bajo coste para ser extrapoladas a zonas con condiciones similares ([Pachepsky et al., 2006](#)).

Para facilitar la implementación práctica de las FET, se han desarrollado varios códigos de cálculo, entre ellos el programa Rosetta v.1.2 ([Schaap et al., 1998, 1999](#)). Rosetta fue desarrollado a finales de los años 90, en el United States Salinity Laboratory, Riverside, California. Rosetta implementa cinco funciones de edafo-transferencia que predicen las curvas de conductividad basadas en ajustes de composición textural y densidad aparente. Este programa emplea en el ajuste de parámetros redes neuronales, para mejorar las predicciones de las FETs empíricas. El software es de distribución libre y gratuita.

Con el objetivo de encontrar una relación entre los parámetros físicos y granulométricos obtenidos de los suelos del Pla de Sant Jordi (Anexo 2) y los valores de conductividad hidráulica saturada (Kfs) medidos en las campañas realizadas, se han aplicado trece FET diferentes (tabla 11) y el programa Rosetta, con la finalidad de comparar los valores de Kfs A obtenidos en campo frente a los valores calculados por las FET.

Las FET utilizadas incluyen diferentes combinaciones de las siguientes variables edáficas de la repetición A recogidas en el Anexo 2: textura (arena, limo y arcilla), densidad aparente (estimada a partir de la densidad real) y porosidad total (estimada a partir de la humedad saturada).

Donde:

| | |
|-----------------------|--|
| K_{fs} | Conductividad hidráulica saturada en campo (cm/h). |
| SA | Contenido en arena (%). |
| SI | Contenido en limo (%). |
| CL | Contenido en arcilla (%). |
| BD | Densidad aparente (Mg/m ³). |
| φ | Porosidad total (cm ³ /cm ³). |

| FPT | Fórmula | Referencia |
|-----|---|----------------------------|
| F1 | $K_{fs} = 0.1 * Exp(10.8731 + 3.914ln(\varphi))$ | Forrest et al. (1985) |
| F2 | $K_{fs} = 2319.055\varphi^{3.66}$ | Minasny y McBratney (2000) |
| F3 | $K_{fs} = 467.5\varphi^{3.15}$ | Suleiman y Ritchie (2000) |
| F4 | $K_{fs} = 4031.57\varphi^{3.295}$ | Ahuja et al. (1984) |
| F5 | $K_{fs} = -2.52 + 581.598\varphi^{1.5} - 6966.14\varphi^{2.5} + 11693.78\varphi^3$ | Spychalski et al. (2007) |
| F6 | $K_{fs} = -3.51 - 18154.6\varphi^{1.5} - 12213.8\varphi^2ln\varphi - 6925.78\varphi/ln\varphi$ | Spychalski et al. (2007) |
| F7 | $K_{fs} = 15.696 Exp(-0.1975CL)$ | Puckett et al. (1985) |
| F8 | $K_{fs} = 30.384 Exp(-0.144CL)$ | Dane and Puckett (1994) |
| F9 | $K_{fs} = 0.0920e^{0.0492*SA}$ | Julia et al. (2004) |
| F10 | $K_{fs} = 2.54 * 10^{(-0.6 + 0.012*SA - 0.0064*CL)}$ | Cosby et al. (1984) |
| F11 | $K_{fs} = Exp[12.01 - 0.0755 * SA + (-3.895 + 0.03671 * SA - 0.1103 * CL + 0.0008755 * CL^2) / (0.332 - 0.0007251 * Sa + 0.1276 * log10CL)]$ | Saxton et al. (1986) |
| F12 | $K_{fs} = Exp[19.524\varphi - 8.9685 - 0.02821CL + 0.0001811SA^2 - 0.009413CL^2 - 8.39522\varphi^2 + 0.07772SA\varphi - 0.003SA^2\varphi^2 - 0.01949CL^2\varphi^2 + 0.000017SA^2CL + 0.0273CL^2\varphi + 0.00143SA^2\varphi - 0.0000035CL^2SA]$ | Brakensiek et al. (1984) |
| F13 | $LogK_{fs} = 9.56 - 0.81LogSI - 1.09LogCL - 4.64BD$ | Jabro (1992) |

Tabla 11. Funciones de edafo-transferencia empleadas en el cálculo de Kfs.

El criterio de evaluación de los modelos (tabla 12) se ha basado en la bondad del ajuste (R^2) y en las medidas del error absoluto medio (MAE) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

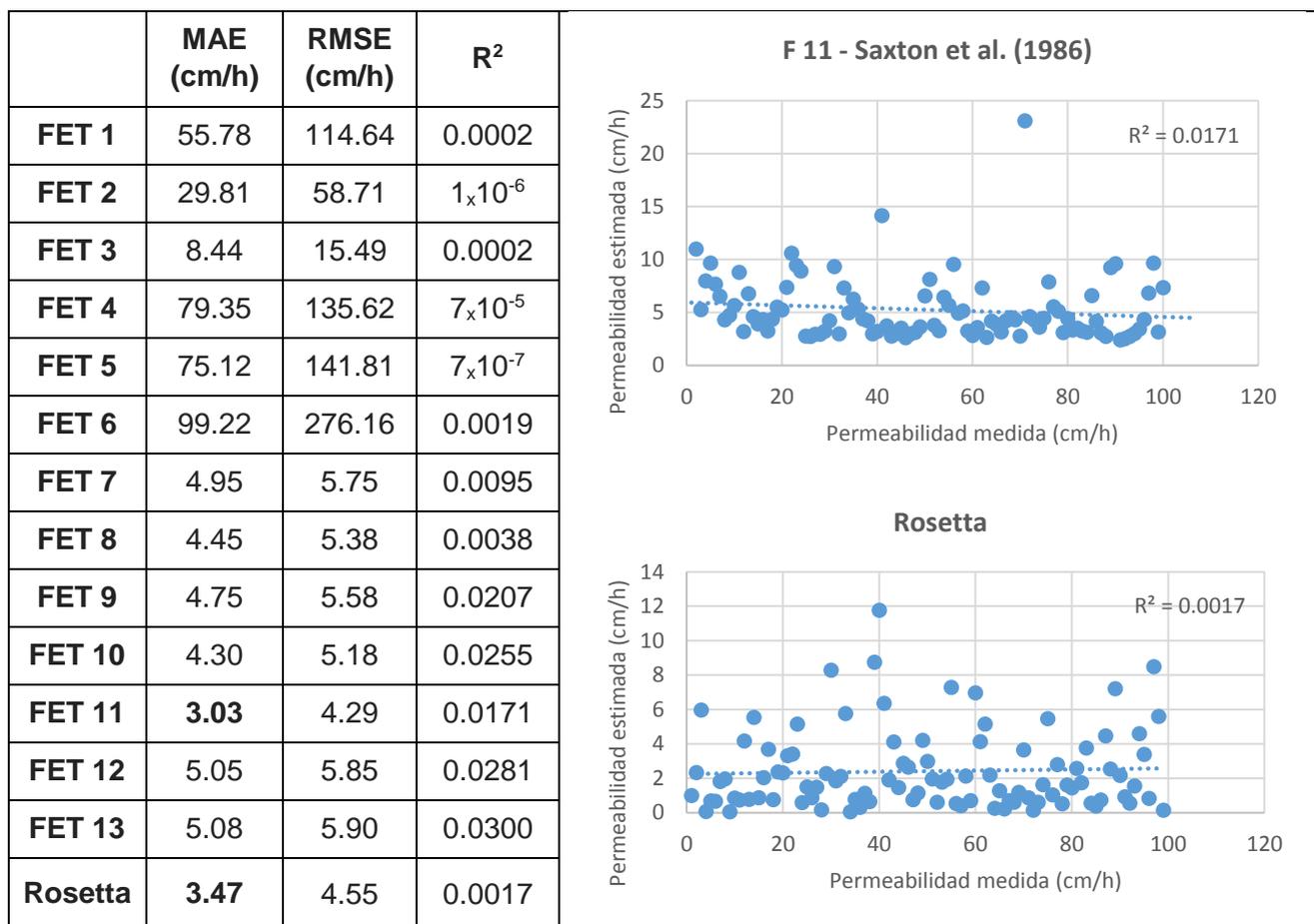


Tabla 12. Resultados obtenidos de las funciones de edafo-transferencia empleadas en el cálculo de Kfs.

Los errores obtenidos mediante la aplicación de las FET a los datos de Kfs medidos en el Pla de Sant Jordi son muy elevados. La mejor estimación se ha obtenido con la FET 11 con un error absoluto medio (MAE) de 3.03 y una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 4.29, cuando los valores observados de Kfs tiene una media de 5.08 y una desviación estándar de 3.01 (tabla 13).

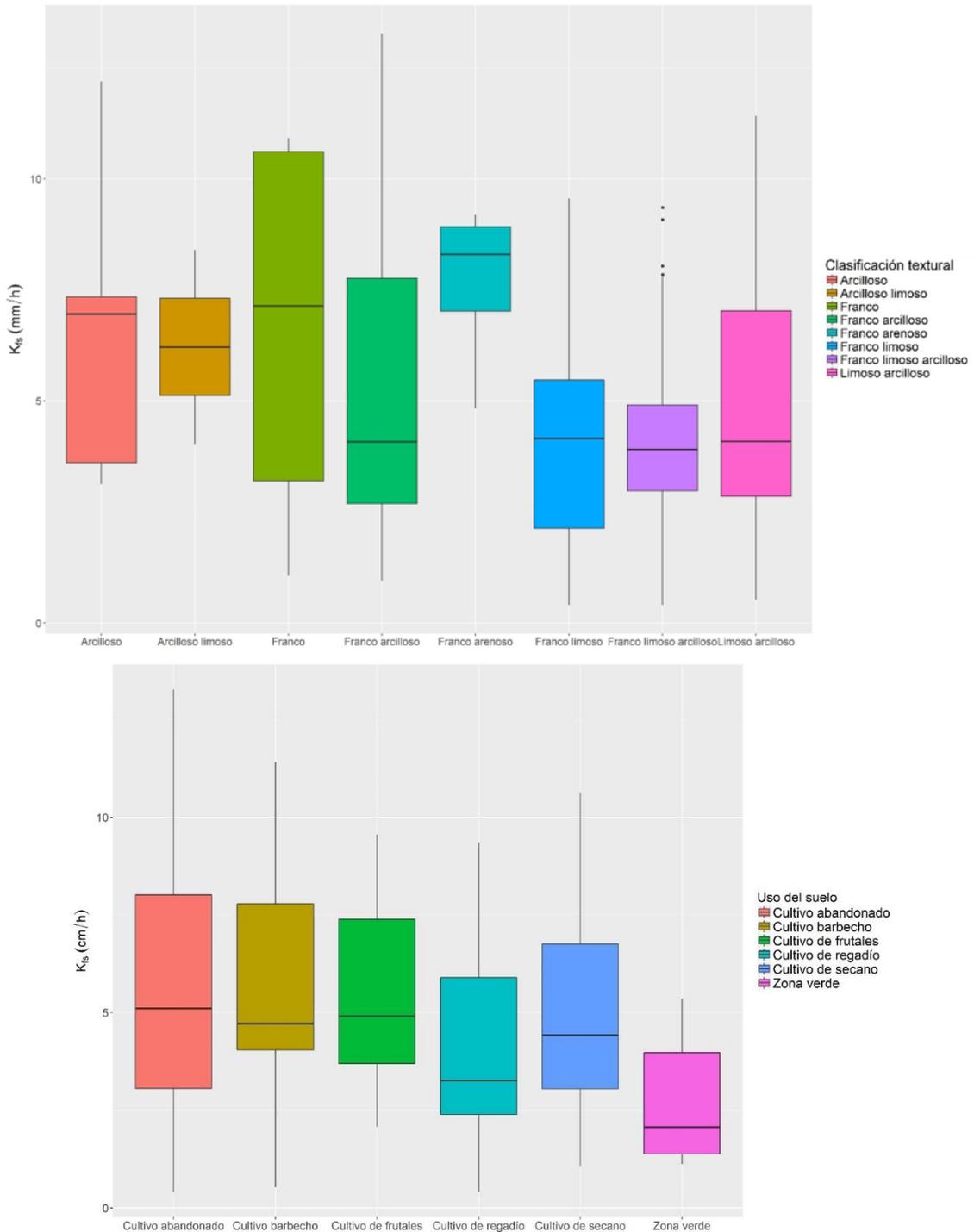
| Media | Mediana | Máximo | Mínimo | Desviación estándar (sd) |
|-------|---------|--------|--------|--------------------------|
| 5.08 | 4.43 | 13.26 | 0.41 | 3.01 |

Tabla 13. Resumen estadístico de los valores de Kfs (en cm/h) empleados en el cálculo de las FET.

Por tanto, se puede concluir que ninguna de las FET utilizadas es adecuada para representar la Kfs de la zona de estudio. Los resultados generados a partir del programa Rosetta, a pesar de que obtienen la segunda mejor estimación, presentan errores igualmente elevados.

- Análisis clúster de propiedades físicas del suelo:

Como paso previo a la elaboración de un modelo específico para estimar la K_{fs} en el Pla de Sant Jordi, se ha llevado a cabo un análisis de correlación y de clúster de variables con el objetivo de identificar aquellas más relacionadas con la K_{fs} en la zona de estudio. En las figuras 34 y 35 se muestra la distribución de valores de K_{fs} en función de las dos variables categóricas: el uso del suelo y la clasificación textural. Como cabe esperar, las texturas más finas presentan los valores más bajos de K_{fs} . En relación al uso del suelo, los valores más bajos de K_{fs} corresponden a suelos con cultivo de regadío y los situados en parques o zonas verde.



Figuras 34 y 35. Diagramas de caja de la distribución de valores de conductividad hidráulica saturada para las diferentes clases texturales según la clasificación USDA y de usos del suelo en el Pla de Sant Jordi.

El gráfico de correlaciones de Pearson entre las variables cuantitativas muestra la baja relación generalizada de la Kfs con el resto de variables medidas (figura 36). Tan sólo aparece una débil asociación lineal significativa con el porcentaje de limo ($r=-0.26$, $p=0.009$), el porcentaje de arena media ($r=0.24$, $p=0.016$) y el porcentaje de arena ($r=0.21$, $p=0.037$). Cabe destacar la importante relación entre el contenido en limo y la latitud geográfica ($r=0.49$, $p<0.01$).

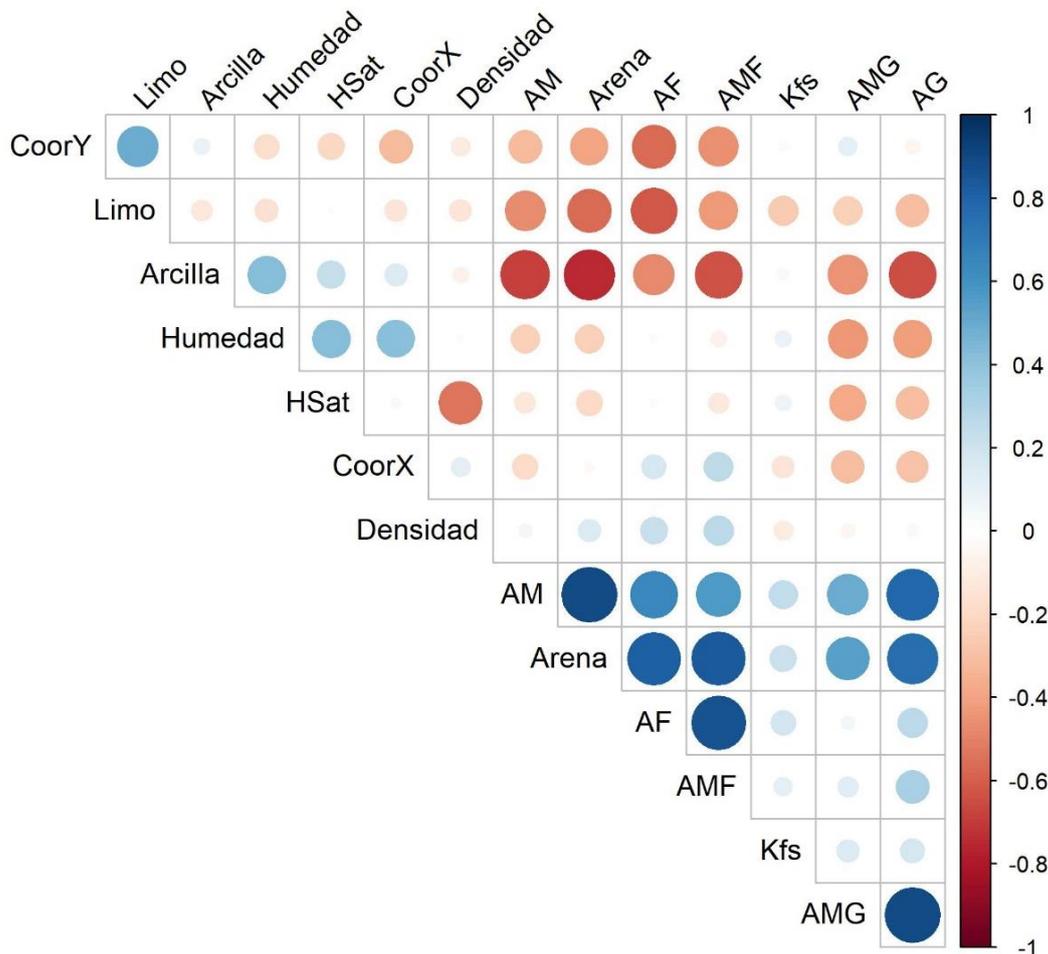


Figura 36. Gráfico de correlaciones de Pearson entre las variables cuantitativas consideradas en el estudio.

El clúster jerárquico de variables (figura 37), permite visualizar la asociación entre variables y, por tanto, es útil para seleccionar variables para un modelo. El criterio de agregación es la maximización de un criterio de homogeneidad en los clústeres. La homogeneidad es una medida de la adecuación entre las variables en el clúster y el centro del clúster, definido por una variable sintética cuantitativa que representa la primera componente principal obtenida en un análisis de componentes principales.

Lo más interesante que muestra el gráfico es la agrupación de la Kfs con el uso del suelo a un alto nivel de agregación (homogeneidad). La relación entre el limo y la latitud vuelve a hacerse evidente. Otra curiosa agrupación es la que refleja el clúster de longitud con humedad del suelo. Una partición en 6 clústeres (cortando por el nivel de agregación óptimo indicado por la línea azul), supone una ganancia de cohesión del 64.2%. Este valor indica el porcentaje de homogeneidad explicado por la partición en 6 clústeres.

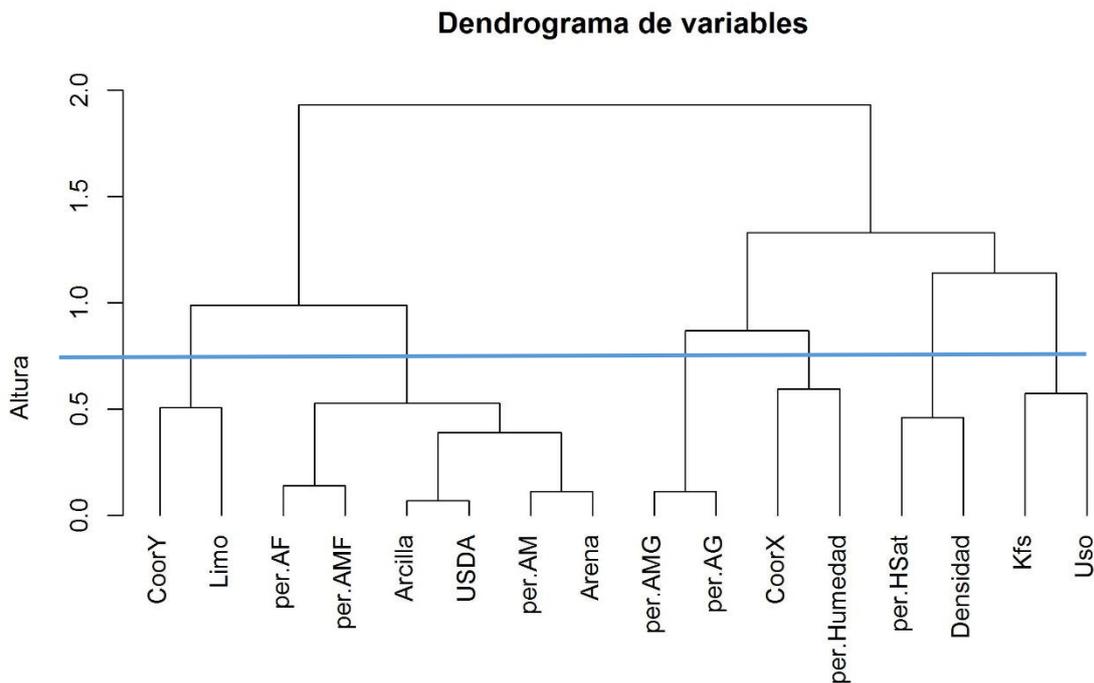


Figura 37. Dendrograma de clasificación de coordenadas geográficas, uso y variables físicas del suelo en la zona del Pla de Sant Jordi. La línea azul marca el nivel de agregación óptimo en seis clústeres homogéneos.

- Modelo predictivo para el cálculo de la Kfs:

Los resultados obtenidos hasta el momento sugieren que un modelo predictivo para el cálculo de la Kfs debería incluir, al menos, el uso del suelo, el porcentaje de limo y el porcentaje de arena o arena media como variables explicativas. En base a esta información y con el criterio de que las variables a incluir en el modelo sean fáciles de determinar y económicas de medir, se ha decidido incluir las siguientes variables: coordenadas geográficas (X, Y), uso del suelo y porcentajes de limo, de arcilla y de alguno de los tipos de arena: Arena Media, (AM), Arena muy Gruesa (AMG) o Arena total (A).

Se han probado los siguientes modelos:

- Regresión lineal
- Algoritmos de machine learning: redes neuronales, random forest, support vector machines y k-nearest neighbour.

Para analizar la capacidad de generalizar de los modelos y predecir adecuadamente nuevos valores de Kfs, se ha llevado a cabo una partición aleatoria 80%-20%, en conjuntos de entrenamiento y de test respectivamente. De esta forma, de los 98 casos, se han utilizado 80 para entrenar los modelos y 18 para evaluar su capacidad predictiva.

El mejor modelo se ha obtenido mediante una red neuronal prealimentada (perceptrón multicapa) simple, con una sola capa oculta (Ripley, 1996). Los parámetros a calibrar en cada modelo de red neuronal son: a) el número de neuronas en la capa oculta intermedia, b) el número máximo de iteraciones, y c) el decaimiento (parámetro de regularización que penaliza la suma de cuadrados de los pesos para evitar el sobre-ajuste, es decir, penaliza los coeficientes grandes en la red).

La estimación de parámetros en cada modelo se ha realizado mediante validación cruzada automática. Las variables cuantitativas (incluida la Kfs) se han normalizado previamente respecto al rango de variación con la siguiente fórmula:

$$x_N = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

En la tabla 14 se presentan los resultados de tres modelos. Se puede observar que las medidas de ajuste (R^2) y en las medidas del error absoluto medio (MAE) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) superan ampliamente a las obtenidas a partir de la aplicación de las funciones de edafo-transferencia (FET), recogidas en la tabla 12.

| Variables entrada | Número neuronas capa intermedia | Número máximo de iteraciones | Decaimiento | R^2 | | MAE (cm/h) | | RMSE (cm/h) | |
|---|---------------------------------|------------------------------|-------------|-------|-------------|------------|------|-------------|------|
| | | | | E | T | E | T | E | T |
| X, Y Uso suelo %Li %Arc %AM | 5 | 125 | 10^{-4} | 0.81 | 0.52 | 1.31 | 2.59 | 1.7 | 2.98 |
| X, Y, Uso suelo %Li %Arc %AMG | 5 | 125 | 10^{-4} | 0.85 | 0.45 | 1.31 | 2.72 | 1.57 | 3.24 |
| X, Y Uso suelo %Li %Arc, %A | 5 | 140 | 10^{-5} | 0.79 | 0.46 | 1.31 | 2.72 | 1.82 | 3.11 |

Tabla 12. Variables de entrada incluidas en los tres modelos de red neuronal, valores óptimos de los parámetros de cada modelo y métricas de ajuste (R^2) y errores (MAE y RMSE). E: entrenamiento, T: test.

Como puede observarse en la tabla 12, en términos globales de ajuste y error en los conjuntos de datos de entrenamiento y de test, el mejor modelo es el que incluye el porcentaje de arena media (AM) como variable explicativa.

En la figura 38 se presentan los diagramas de dispersión de valores observados y calculados para los conjuntos de entrenamiento y test del mejor modelo obtenido. El ajuste a los datos de entrenamiento es muy bueno. En el caso de los datos de test hay que destacar que, aunque el ajuste es peor, entre las 18 observaciones escogidas aleatoriamente hay valores de Kfs tanto muy bajos como muy altos, y que el modelo es capaz de capturar razonablemente bien el orden de magnitud de los valores que predice.

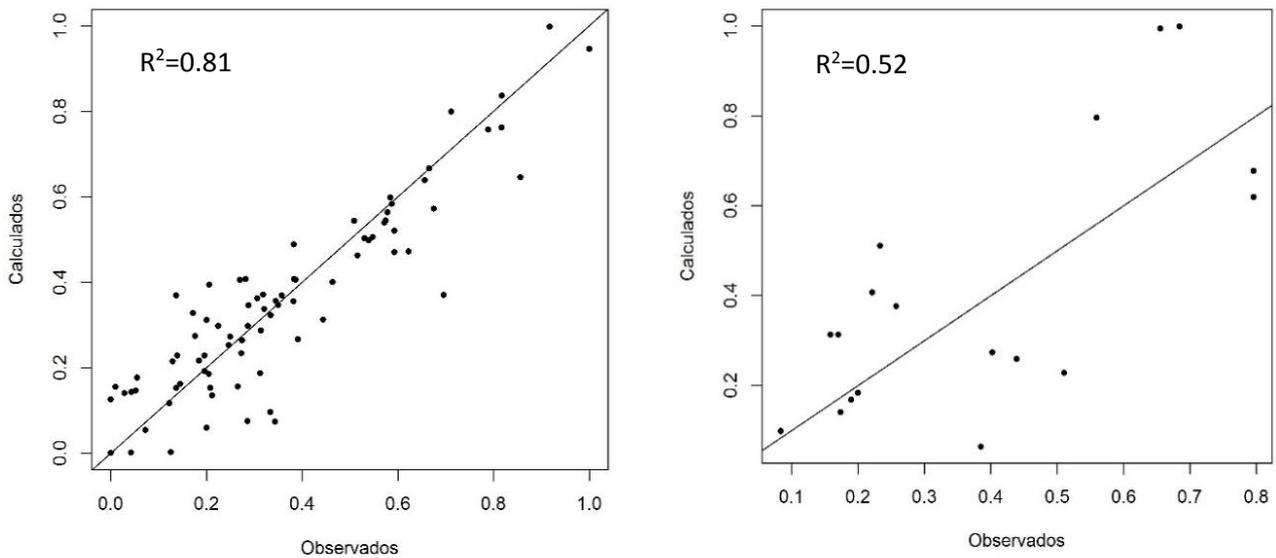


Figura 38. Diagramas de dispersión de valores calculados y observados del mejor modelo de red neuronal obtenido; conjunto de datos de entrenamiento (izquierda) y conjunto de datos de test (derecha).

La topología de la red neuronal se muestra en la figura 39, con las variables de entrada, la capa intermedia con cinco neuronas y la capa de salida con la variable Kfs estimada. Los pesos positivos entre capas quedan representados por líneas negras y los pesos negativos por líneas grises. El grosor de las líneas es proporcional a la magnitud relativa de cada peso. Así, por ejemplo, se observa como la salida de la neurona oculta H4 tiene una alta influencia positiva sobre la Kfs.

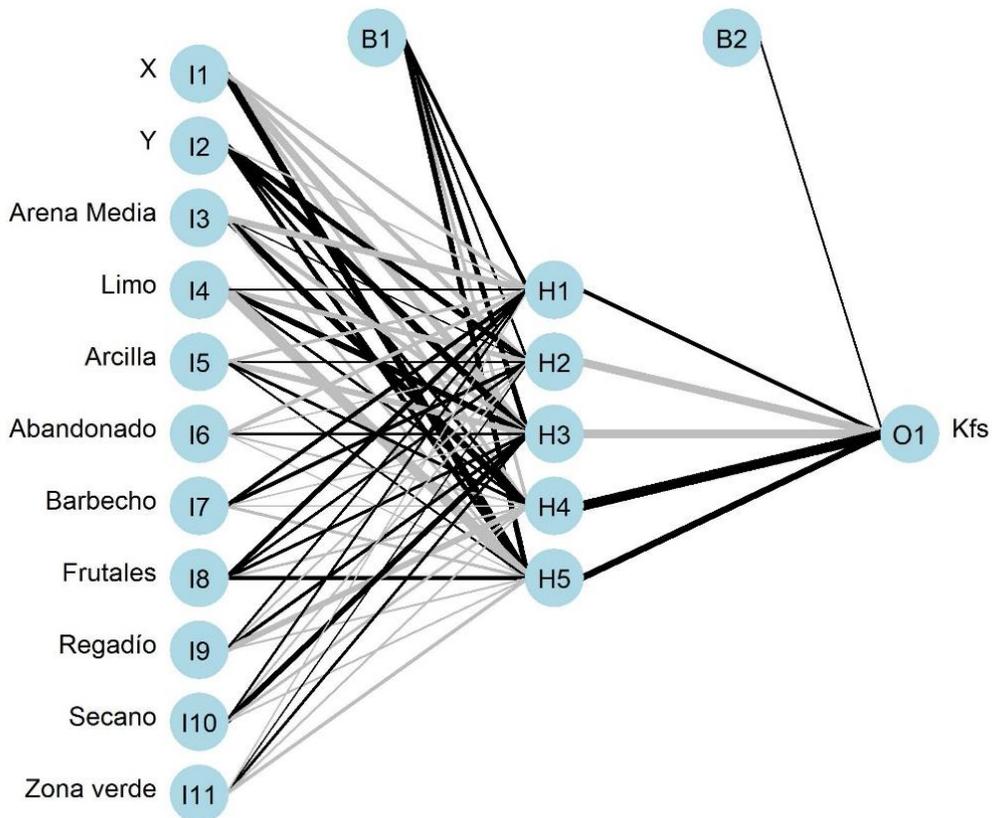


Figura 39. Estructura de la red neuronal que mejor estima la conductividad hidráulica saturada en el Pla de Sant Jordi. Consta de una capa de entrada con las variables explicativas (I1-I11), una capa oculta con cinco neuronas (H1-H5) y una capa de salida con una única neurona (O1).

La importancia relativa de las variables en la red neuronal se ha determinado mediante el método de Olden (Olden et al., 2004). El método calcula la importancia de cada variable como la suma del producto de los pesos de conexión entrada-oculta por oculta-salida a través de todas las neuronas ocultas. Por ejemplo, la importancia de la variable Limo se obtendría como la suma del siguiente producto de pesos: $I4-H1*H1-O1 + I4-H2*H2-O1 + I4-H3*H3-O1 + I4-H4*H4-O1 + I4-H5*H5-O1$.

Una ventaja de este enfoque es que la contribución relativa de cada peso de conexión se mantiene tanto en términos de magnitud como de signo (los pesos de conexión que cambian de signo entre entrada y salida a la capa oculta tiene efecto de cancelación). Los valores de importancia deben ser interpretados como signo y magnitud relativa entre las variables.

Se observa que las variables longitud (X), porcentaje de arcilla y porcentaje de arena media son las que presentan una relación positiva más fuerte con la Kfs, mientras que los usos del suelo regadío y seco junto con el porcentaje de limo son las variables con mayor influencia negativa sobre la Kfs. El gráfico de la figura 40 representa la importancia relativa de cada variable y su signo como un valor entre -1 y 1.

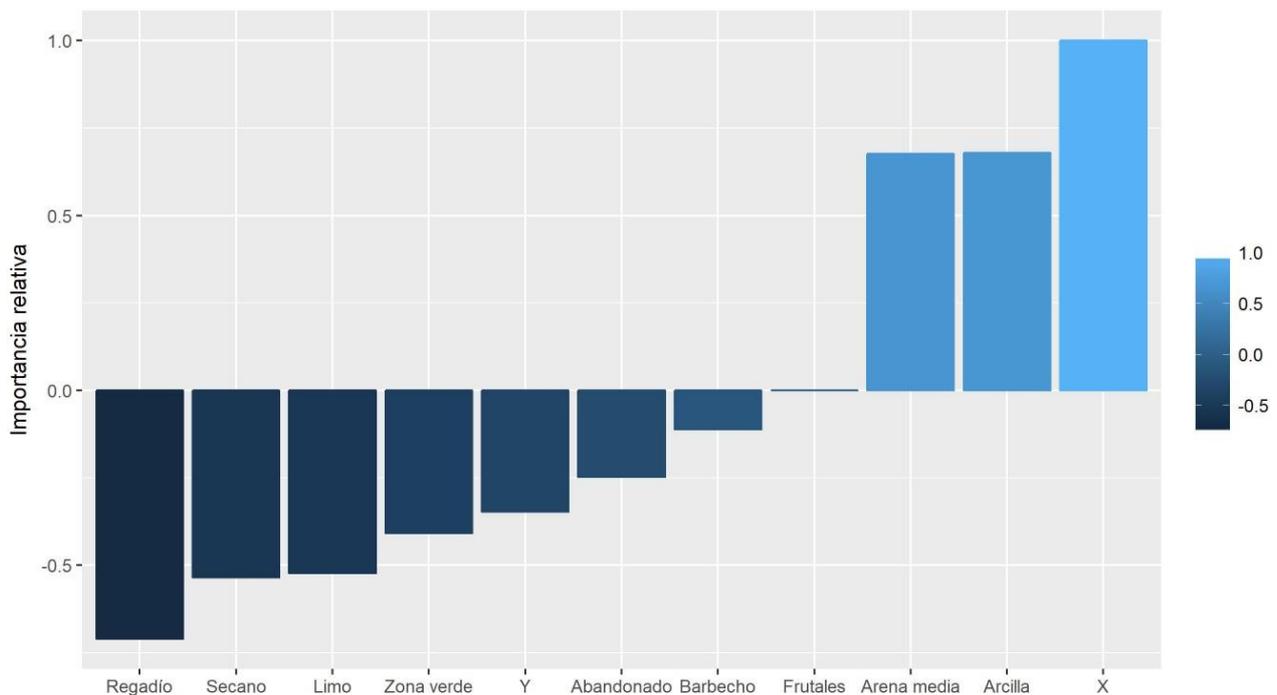


Figura 40. Diagrama de barras de la importancia relativa de las variables en el modelo de red neuronal que mejor estima la conductividad hidráulica saturada (figura 39) según el método de Olden y otros (2004).

Las variables con importancia relativa próxima a cero, como los cultivos de frutales, en barbecho o abandonados, no tienen una importancia significativa para explicar la variación de Kfs. Sorprende el hecho de que la Kfs esté positivamente influenciada por el contenido en arcilla, hecho que se observa también en los otros dos modelos (incluyendo la arena o la arena media gruesa); por ejemplo, consultando el Anexo 2, encontramos suelos con alto contenido en arcilla que presentan valores altos de Kfs, como por ejemplo los ensayos 63, 92, 99, 125 o 132.

De este hecho se puede deducir que el efecto de la antropización a la que está sometida la zona de estudio condiciona la heterogeneidad espacial de los valores de Kfs.

Por último, se ha realizado una validación cruzada para comprobar la robustez del modelo frente a variaciones de los datos de entrenamiento y test. Para ello, se ha variado el número de elementos en el conjunto de entrenamiento entre 10 y 80 (el resto de elementos se asignan al conjunto de test) y para cada caso se han tomado 100 muestras aleatorias del conjunto total de datos. El modelo se entrena en cada uno de los 7100 conjuntos de entrenamiento ($71 \cdot 100$) y se evalúa sobre el conjunto de test correspondiente a través del RMSE.

En la figura 41 se muestra la variación de la mediana del RMSE con el tamaño del conjunto de entrenamiento. La precisión de la red neuronal es sensible a la partición entrenamiento-test. La precisión del modelo aumenta con el tamaño del conjunto de entrenamiento y el rango de medianas de RMSE se mantiene entre 3.75 y 4.75, lo que indica que el modelo es robusto.

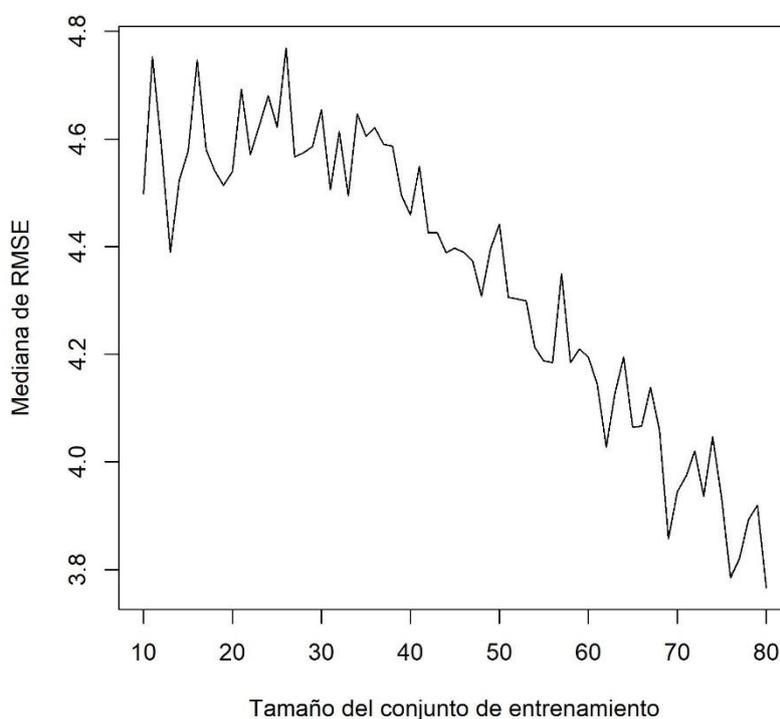


Figura 41. Mediana de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para cada una de las 100 muestras con diferentes tamaños del conjunto de datos de entrenamiento entre 10 y 80 elementos.

5. CONCLUSIONES

Del análisis de los datos presentados, se puede indicar lo siguiente:

- La zona de estudio del Pla de Sant Jordi que muestra una menor conductividad hidráulica saturada (Kfs) se localiza al Noreste del aeropuerto Son Sant Joan, entre los núcleos urbanos de Sant Jordi y Sa Casa Blanca; junto con varios sectores del Molinar - Son Malferit, la carretera de Puntiró y S'Aranjassa.
- Las áreas del Pla de Sant Jordi con una mayor conductividad hidráulica saturada (Kfs) se localizan en los alrededores de Son Llätzer - Son Ferriol, zona norte de Coll d'en Rabassa, sur de Son Ametler y sureste de El Arenal.
- El mapa de Kfs obtenido mediante kriging simple está condicionado por la elevada variabilidad a pequeña escala. Es recomendable incrementar el número de ensayos en ciertas zonas concretas, con el fin de obtener datos de una mayor fiabilidad y mejorar la calidad del mapa interpolado.
- Con el propósito de mejorar la estimación de Kfs en el Pla de Sant Jordi, se ha constatado que las funciones de edafo-transferencia habituales no son adecuadas para representar los materiales alterados y antropizados de la zona de estudio.
- Se ha buscado un modelo específico de estimación de Kfs a partir de variables relacionadas, que a su vez, sean fáciles y económicas de determinar en campo. Las variables seleccionadas han sido los porcentajes granulométricos, el uso del suelo y las coordenadas geográficas. El mejor modelo obtenido ha sido una red neuronal con una sola capa intermedia con cinco neuronas. Las variables más importantes del modelo son la longitud geográfica, los contenidos de arcilla, arena media y limo, así como los usos de regadío y de secano.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahuja, L.R., Naney, J.W., Green, R.E., & Nielsen, D.R. (1984). Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 699-702.
- Bagarello, V., Sferlazza, S., & Sgroi, A. (2009). Comparing two methods of analysis of single-ring infiltrometer data for a sandy-loam soil. *Geoderma*, 149, 415–420.
- Barón, A. (1987). *Hidrogeología de la isla de Mallorca*. Conselleria d'Obres Públiques i Ordenació del Territori del Govern Balear. Informe inédito. Islas Baleares: Servei Hidràulic de Balears SHB.
- Brakensiek, D.L., Rawls, W.J., & Stephenson, G.R. (1984). Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. *American Society of Agricultural Engineers*, 84 (Annual Meeting).
- Chica-Olmo, M., Delgado-García, J., y Pardo-Igúzquiza, E. (1995). *Introducción al Análisis Geoestadístico de variables espaciales*. Logroño. 308p.
- Colombo, F., Fornós, J., Marzo, M., Pomar, I., Ramos-Guerrero, E., y Rodríguez-Perea, A. (1991). Evolución Tectónico-Sedimentaria y Análisis Estratigráfico del Terciario de la Isla de Mallorca. *I Congreso del grupo español del Terciario (Vic, 1991)*. Libro-Guía Excursión nº2. Universitat de Barcelona.
- Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B., & Ginn, T.R. (1984). A statistical exploration of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20, 682–690.
- Dane, J.H., & Puckett, W. (1994). Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In: Van Genuchten, M.T. (Ed.) *Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. University of California, Riverside, CA, 389–403.
- De la O, A., y Gil, I. (1996). *Drenaje del Pla de Sant Jordi (Palma de Mallorca)*. Ministerio de Agricultura i Conselleria d'Agricultura. Mallorca. 97 p.
- Díez-Herrero, A., Bernat, M., Perucha, M.A., Morello, C., Díaz de la Cruz, V., Hernando, N., Manzanares, C., Portuondo, L., y Martín, J.F. (2015). *Estudio de la peligrosidad por inundaciones en el Pla de Sant Jordi (Mallorca, islas baleares) y propuesta para la renaturalización hidromorfológica estable de su drenaje superficial*. Informe inédito. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Estudio de Ingeniería y Urbanismo –ESTIU– (2007). *Estudio de soluciones para el drenaje del tramo final del Torrent de Sa Siquia en la playa de Palma*.
- Forrest, J.A., Beatty, J., Hignett, C.T., Pickering, J.H., & Williams, R.G.P. (1985). A survey of the physical properties of Wheatland soils in eastern Australia. *CSIRO: Australia Division of Soils*, 78.
- Gelabert, B., y Sabat, F. (2004). Mallorca y Cabrera: Unidades geológicas y estructura. En: Vera, J.A. (Ed.) *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid, 450-452.
- González-Hernández, F. M., Goy, J.L., Zazo, C., y Silva, P.G. (2001). Actividad eólica y cambios del nivel del mar durante los últimos 170.000 años (litoral de Mallorca, Islas Baleares). *Revista Cuaternario & Geomorfología*, 15 (3-4), 67-75.
- Goy, J.L., Zazo, C., y Cuerda, J. (1997). Evolución de las áreas margino-litorales de la costa de Mallorca (I. Baleares) durante el último y presente interglacial: nivel del mar holoceno y clima. *Boletín Geológico y Minero*, 108-4, 455-463.

- Grimalt-Gelabert, M. (1985). *La población dentro del espacio del Pla de Sant Jordi, Palma (Mallorca)*. Memoria de licenciatura, Universitat de les Illes Balears.
- Hatt, B., & Le Coustumer, S. (2008). *In Situ Measurement of Hydraulic Conductivity*. Practice Note 1: Facility for Advancing Water Biofiltration (FAWB), Monash University.
- Jabro, J.D. (1992). Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Transactions of ASAE*, 35 (2), 557–560.
- Julia, M.F., Monreal, T.E., Jimenez, A.S.C., & Garc-Meléndez E. (2004). Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using Pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*, 123, 257–277.
- López-García, J.M. (2003). Recarga de acuíferos con agua residual depurada en el Llano de Palma de Mallorca. 30 años de experiencia. *Serie del IGME: Hidrogeología y aguas subterráneas*, 11.
- López-García, J.M. (2015). *Caracterización hidrogeológica de la masa de agua subterránea del Pla de Sant Jordi para el estudio de las inundaciones en el Pla*. Informe inédito. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- López-García, J.M., y Mateos, R.M. (2003). La intrusión marina en los acuíferos de la isla de Mallorca. En: López-García, J.M., De Dios, J., De la Orden, J.A., Ramos, G., y Rodríguez, L. (Eds.) *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos*. IGME, Madrid, 383-392.
- Mateos, R.M., y González-Casanovas, C. (2009). *Los caminos del agua en las Islas Baleares. Acuíferos y manantiales*. Instituto Geológico y Minero de España - Conselleria de Medi Ambient del Govern de les Illes Balears. 280p.
- Minasny, B., & McBratney, A.B. (2000). Evaluation and development of hydraulic conductivity Pedotransfer functions for Australian soil. *Australian Journal of Soil Research*, 38, 905–926.
- Moreno, L., De la Losa, A., Robledo, P.A., y Palmer, E. (2015). *Informe sobre los ensayos de infiltración en suelos mediante infiltrómetro de anillo simple en el Pla de Mallorca*. Informe inédito. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Nemes, A., Rawls, W.J., & Pachepsky, Y. A. (2005). Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1330-1337.
- Olden, J.D., Joy, M.K., & Death, R.G. (2004). An accurate comparison of methods for quantifying variable importance in artificial neural networks using simulated data. *Ecological Modelling*, 175, 389-397.
- Pachepsky, Y. A., Rawls, W. J., & Lin. H. S. (2006). Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma*, 131, 308-316.
- Pomar, L., Marzo, M., y Barón, A. (1983). El Terciario de Mallorca. *El Terciario de las Baleares: guía de las excursiones del X Congreso Nacional de Sedimentología*. Menorca. 21 – 44.
- Puckett, W.E., Dane, J.H., & Hajek, B.H. (1985). Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Science Society of American Journal*, 49, 831–836.
- Reynolds, W.D., & Elrick, D.E. (1990). Pondered infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1233–1241.
- Ripley, B. D. (1996). *Pattern Recognition and Neural Networks*. Cambridge University Press. 416p.
- Robledo, P.A., Díez-Herrero, A., Perucha, M.A., Bernat, M., Martín, J.F., López, J.M., Sevillano, A., Guardiola-Albert, C., Pardo-Igúzquiza, E., Moreno, L., Palmer, E., y Cantón, J.L. (2014). Aspectos

hidrogeomorfológicos en el estudio de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi (Mallorca). En: Schnabel, S. y Gómez-Gutiérrez, A. (Eds.) *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014, XIII Reunión Nacional de Geomorfología, Cáceres*. Universidad de Extremadura y Sociedad Española de Geomorfología, 60-63.

Robledo, P.A. (2015). *Informe de resultados en virtud del convenio específico de colaboración entre la empresa municipal de Aigües i Clavegueram S.A. de Palma de Mallorca y el Instituto Geológico y Minero de España para el estudio científico-técnico de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi (Palma de Mallorca, Baleares)*. Informe inédito. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Robledo, P.A. (2016). Avances en la investigación científica y técnica de las inundaciones en el Pla de Sant Jordi (Palma de Mallorca) Illes Balears, España. *Serie del IGME: Hidrogeología y aguas subterráneas*, 33.

Roselló i Verger, V. M. (1959). El Prat de Sant Jordi y su desecación. *Boletín de la Cámara de Comercio, Industria y Navegación de Palma de Mallorca*, 622, 1-10.

RStudio Team (2016). *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio. Inc. Boston, MA. URL: <http://www.rstudio.com/>.

Samper, F.J., y Carrera, J. (1990). *Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea*. 2da Ed. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona.484p.

Saxton, K.E., Rawls, W.L., Rosenberger, J.S., & Papendick, R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1031–1238.

Schaap, M.G., Leij F.J., & Van Genuchten M.Th. (1998). Neural network analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 847-855.

Schaap, M.G., Leij F.J., & Van Genuchten. M. Th. (1999). A bootstrap neural-network approach to predict soil hydraulic parameters. In: Van Genuchten, M. Th., F.J. Leij, & Wu, L. (Eds.) *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*. University of California, Riverside, CA, 1237-1250.

Sobieraj, J.A., Elsenbeer, H., & Vertessy, R. A. (2001). Pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity: implications for modeling storm flow generation. *Journal of Hydrology*, 251, 202-220.

Spychalski, M., Kazmierowski, C., & Kaczmarek, Z. (2007). Estimation of saturated hydraulic conductivity on the basis of drainage porosity. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 10(1), 4.

Suleiman, A.A., & Ritchie, J.T. (2000). Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity. *Soil Science Society of America Journal*, 44(2), 235–239.

Verbist, K., Cornelis, W.M., Gabriels, D., Alaerts, K., & Soto, G. (2009). Using an inverse modelling approach to evaluate the water retention in a simple water harvesting technique. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 1979–1992.

Whitlow, R. (2001). *Basic Soil Mechanics*. Harlow, England: Pearson Education (4th edition).

ANEXO 1 FICHAS DE LOS ENSAYOS DE INFILTRACIÓN

Documento aparte

ANEXO 2 MUESTRAS DE SUELO: ANÁLISIS FÍSICOS Y GRANULOMÉTRICOS

| Punto | Zona | Uso del suelo | Kfs A (mm/h) | Kfs B (mm/h) | K media (mm/h) | Humedad A % | Humedad B % | Humedad SAT % | Peso Húmedo A (g) | Peso Húmedo B (g) | Peso Húmedo SAT (g) | Peso Seco A (g) | Peso Seco B (g) | Peso seco SAT (g) | Densidad Real A (g/cm3) | ARENA A (%) | LIMO A (%) | ARCILLA A (%) | USDA |
|-------|-------------------|---------------------|--------------|--------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------|------------|---------------|-------------------------|
| 2 | Coll d'en Rabassa | Cultivo de secano | 45.3 | 67.2 | 56.25 | 1.86 | 1.77 | 32.80 | 109.73 | 116.81 | 143.17 | 107.73 | 114.78 | 107.81 | 2.61 | 18.56 | 52.79 | 28.65 | Franco limoso arcilloso |
| 3 | Coll d'en Rabassa | Cultivo abandonado | 55.8 | 60.5 | 58.15 | 1.68 | 1.61 | 22.11 | 92.34 | 104.17 | 172.91 | 90.81 | 102.52 | 141.60 | 2.60 | 15.97 | 60.11 | 23.92 | Franco limoso |
| 4 | Coll d'en Rabassa | Cultivo de secano | 29.8 | 67.2 | 48.50 | 1.94 | 1.82 | 28.23 | 188.60 | 166.47 | 129.74 | 185.01 | 163.49 | 101.18 | 2.65 | 16.47 | 62.21 | 21.33 | Franco limoso |
| 6 | El Molinar | Cultivo de regadío | 9.5 | 11.2 | 10.35 | 5.37 | 1.97 | 34.20 | 139.92 | 89.99 | 139.21 | 132.79 | 88.25 | 103.73 | 2.60 | 14.17 | 60.77 | 25.06 | Franco limoso |
| 7 | El Molinar | Cultivo de regadío | 4.1 | 8.5 | 6.30 | 1.70 | 1.96 | 34.12 | 135.23 | 92.54 | 138.89 | 132.97 | 90.76 | 103.56 | 2.58 | 24.29 | 52.04 | 23.67 | Franco limoso |
| 9 | Coll d'en Rabassa | Cultivo de secano | 88.4 | 150.1 | 119.25 | 1.68 | 1.97 | 25.99 | 114.23 | 115.48 | 103.89 | 112.34 | 113.25 | 82.46 | 2.61 | 25.62 | 45.63 | 28.75 | Franco arcilloso |
| 10 | Son Malferit | Cultivo de secano | 69.7 | 68.2 | 68.95 | 1.64 | 1.68 | 23.45 | 112.06 | 127.94 | 146.93 | 110.25 | 125.82 | 119.02 | 2.65 | 15.87 | 52.59 | 31.54 | Franco limoso arcilloso |
| 12 | Coll d'en Rabassa | Cultivo de secano | 106.3 | 99.2 | 102.75 | 0.81 | 1.11 | 15.98 | 222.80 | 204.66 | 157.46 | 221.02 | 202.42 | 135.77 | 2.64 | 27.91 | 47.79 | 24.30 | Franco |
| 14 | Cas Boll | Cultivo de secano | 105.4 | 72.6 | 89.00 | 1.13 | 0.76 | 17.31 | 134.56 | 142.56 | 162.90 | 133.05 | 141.48 | 138.86 | 2.57 | 37.57 | 45.65 | 16.77 | Franco |
| 16 | Es Pla de na Tesa | Cultivo abandonado | 24.5 | 39.9 | 32.20 | 1.17 | 1.06 | 17.89 | 128.29 | 127.25 | 158.29 | 126.81 | 125.92 | 134.27 | 2.58 | 27.17 | 40.04 | 32.79 | Franco arcilloso |
| 18 | Son Ferriol | Cultivo abandonado | 53.7 | 54.3 | 54.00 | 1.91 | 1.97 | 34.11 | 101.18 | 107.28 | 156.48 | 99.28 | 105.21 | 116.68 | 2.59 | 22.61 | 53.63 | 23.76 | Franco limoso |
| 19 | Son Llätzer | Cultivo de secano | 89.6 | 104.6 | 97.10 | 1.04 | 1.23 | 15.39 | 128.85 | 137.69 | 167.02 | 127.53 | 136.02 | 144.75 | 2.61 | 34.03 | 41.03 | 24.94 | Franco |
| 20 | Sa Casa Blanca | Cultivo de secano | 77.9 | 77.3 | 77.60 | 3.69 | 4.16 | 40.28 | 89.99 | 102.64 | 149.06 | 86.79 | 98.54 | 106.26 | 2.55 | 10.19 | 51.47 | 38.34 | Franco limoso arcilloso |
| 21 | Sa Casa Blanca | Cultivo de regadío | 32.4 | 39.6 | 36.00 | 27.97 | 26.05 | 53.21 | 155.44 | 132.73 | 131.32 | 121.47 | 105.30 | 85.71 | 2.54 | 7.96 | 54.53 | 37.51 | Franco limoso arcilloso |
| 22 | Sa Casa Blanca | Cultivo abandonado | 40.9 | 31.1 | 36.00 | 5.30 | 8.55 | 39.31 | 112.44 | 109.82 | 151.83 | 106.78 | 101.17 | 108.99 | 2.55 | 9.52 | 46.79 | 43.69 | Limoso arcilloso |
| 23 | Sant Jordi | Cultivo en barbecho | 40.8 | 45.5 | 43.15 | 2.10 | 1.91 | 34.83 | 101.46 | 117.32 | 131.57 | 99.37 | 115.12 | 97.58 | 2.55 | 22.46 | 47.74 | 29.79 | Franco arcilloso |
| 24 | Sant Jordi | Cultivo en barbecho | 21.9 | 19.8 | 20.85 | 1.39 | 1.36 | 27.14 | 130.28 | 140.43 | 149.05 | 128.49 | 138.55 | 117.23 | 2.60 | 27.34 | 47.88 | 24.78 | Franco |

| Punto | Zona | Uso del suelo | Kfs A (mm/h) | Kfs B (mm/h) | K media (mm/h) | Humedad A % | Humedad B % | Humedad SAT % | Peso Húmedo A (g) | Peso Húmedo B (g) | Peso Húmedo SAT (g) | Peso Seco A (g) | Peso Seco B (g) | Peso seco SAT (g) | Densidad Real A (g/cm3) | ARENA A (%) | LIMO A (%) | ARCILLA A (%) | USDA |
|-------|-------------------|---------------------|--------------|--------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------|------------|---------------|-------------------------|
| 27 | Es Pil-lari | Cultivo en barbecho | 50 | 67 | 58.50 | 0.86 | 0.99 | 27.63 | 109.15 | 121.72 | 261.59 | 108.22 | 120.53 | 204.96 | 2.61 | 44.59 | 34.85 | 20.56 | Franco |
| 28 | Son Malferit | Cultivo abandonado | 21.7 | 16.3 | 19.00 | 2.33 | 1.95 | 31.58 | 113.77 | 102.70 | 127.97 | 111.18 | 100.74 | 97.26 | 2.58 | 20.35 | 56.25 | 23.40 | Franco limoso |
| 29 | Son Malferit | Cultivo de secano | 45 | 62 | 53.50 | 2.18 | 1.93 | 32.05 | 110.42 | 119.94 | 148.50 | 108.06 | 117.67 | 112.46 | 2.59 | 25.35 | 56.91 | 17.74 | Franco limoso |
| 30 | Son Malferit | Zona verde / parque | 44.2 | 22.9 | 33.55 | 1.42 | 1.57 | 17.36 | 107.15 | 108.74 | 147.09 | 105.65 | 107.06 | 125.33 | 2.54 | 23.27 | 57.16 | 19.57 | Franco limoso |
| 31 | Son Bonet | Zona verde / parque | 53.6 | 30.8 | 42.20 | 2.42 | 2.89 | 43.44 | 99.52 | 69.17 | 137.16 | 97.17 | 67.23 | 95.62 | 2.50 | 23.74 | 56.15 | 20.12 | Franco limoso |
| 32 | Son Ferriol | Cultivo abandonado | 32.9 | 89.4 | 61.15 | 1.67 | 2.04 | 19.42 | 132.28 | 114.82 | 166.92 | 130.11 | 112.52 | 139.78 | 2.58 | 20.89 | 40.28 | 38.83 | Franco arcilloso |
| 33 | Son Ferriol | Cultivo de secano | 31.3 | 39.1 | 35.20 | 2.89 | 2.78 | 31.80 | 115.64 | 130.33 | 142.92 | 112.39 | 126.80 | 108.44 | 2.59 | 9.03 | 38.78 | 52.19 | Arcilloso |
| 34 | Son Ferriol | Cultivo en barbecho | 76 | 88.5 | 82.25 | 1.55 | 1.13 | 21.54 | 125.33 | 125.94 | 161.22 | 123.42 | 124.53 | 132.65 | 2.62 | 24.10 | 40.32 | 35.58 | Franco arcilloso |
| 35 | Es Pil-lari | Cultivo de secano | 43.4 | 24.8 | 34.10 | 7.82 | 9.50 | 24.58 | 123.60 | 124.51 | 144.15 | 114.64 | 113.71 | 115.71 | 2.64 | 19.24 | 42.26 | 38.50 | Franco limoso arcilloso |
| 36 | Es Pil-lari | Cultivo abandonado | 80.3 | 74.4 | 77.35 | 13.47 | 9.05 | 27.39 | 176.40 | 77.88 | 149.29 | 155.46 | 71.42 | 117.19 | 2.64 | 30.53 | 38.29 | 31.18 | Franco arcilloso |
| 37 | Es Pil-lari | Cultivo de secano | 10.8 | 35 | 22.90 | 11.16 | 15.62 | 21.95 | 119.28 | 131.39 | 170.69 | 107.30 | 113.64 | 139.97 | 2.62 | 42.52 | 33.95 | 23.52 | Franco |
| 38 | El Arenal | Cultivo de frutales | 77.5 | 116.5 | 97.00 | 9.90 | 12.55 | 39.54 | 103.23 | 117.83 | 152.64 | 93.93 | 104.69 | 109.39 | 2.63 | 59.60 | 28.12 | 12.28 | Franco arenoso |
| 39 | Es Pil-lari | Cultivo de frutales | 79.2 | 42.4 | 60.80 | 7.74 | 5.67 | 23.27 | 118.44 | 138.56 | 125.50 | 109.93 | 131.12 | 101.81 | 2.61 | 36.76 | 33.39 | 29.85 | Franco arcilloso |
| 42 | Son Banya | Cultivo de regadío | 20.2 | 18.1 | 19.15 | 17.70 | 20.39 | 43.06 | 130.52 | 128.68 | 143.29 | 110.89 | 106.89 | 100.16 | 2.59 | 14.26 | 60.09 | 25.65 | Franco limoso |
| 43 | L'Hostalot | Cultivo de regadío | 7.8 | 22.2 | 15.00 | 3.84 | 5.88 | 21.52 | 91.49 | 133.89 | 183.62 | 88.11 | 126.45 | 151.10 | 2.61 | 15.24 | 53.77 | 30.99 | Franco limoso arcilloso |
| 44 | Ctra. Puntiró | Zona verde / parque | 26.4 | 18.6 | 22.50 | 13.07 | 9.76 | 12.66 | 206.81 | 181.13 | 176.86 | 182.90 | 165.02 | 156.99 | 2.69 | 17.70 | 55.77 | 26.53 | Franco limoso |
| 49 | Ctra. Casa Blanca | Cultivo en barbecho | 44.4 | 49.6 | 47.00 | 15.01 | 16.23 | 22.67 | 146.94 | 144.81 | 143.10 | 127.76 | 124.59 | 116.65 | 2.61 | 18.37 | 53.10 | 28.52 | Franco limoso arcilloso |
| 50 | Ctra. Casa Blanca | Cultivo de regadío | 26.1 | 19.8 | 22.95 | 10.22 | 8.39 | 19.22 | 155.74 | 139.98 | 155.26 | 141.30 | 129.14 | 130.23 | 2.67 | 13.52 | 52.53 | 33.95 | Franco limoso arcilloso |
| 52 | Sa Casa Blanca | Cultivo de regadío | 93.5 | 59.5 | 76.50 | 17.72 | 19.40 | 32.36 | 140.55 | 132.85 | 150.32 | 119.39 | 111.26 | 113.57 | 2.61 | 18.58 | 49.37 | 32.05 | Franco limoso arcilloso |

| Punto | Zona | Uso del suelo | Kfs A (mm/h) | Kfs B (mm/h) | K media (mm/h) | Humedad A % | Humedad B % | Humedad SAT % | Peso Húmedo A (g) | Peso Húmedo B (g) | Peso Húmedo SAT (g) | Peso Seco A (g) | Peso Seco B (g) | Peso seco SAT (g) | Densidad Real A (g/cm3) | ARENA A (%) | LIMO A (%) | ARCILLA A (%) | USDA |
|-------|-------------------|---------------------|--------------|--------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------|------------|---------------|-------------------------|
| 54 | Sant Jordi | Cultivo de secano | 30.8 | 47 | 38.90 | 13.00 | 11.09 | 29.79 | 144.80 | 132.60 | 168.08 | 128.14 | 119.36 | 129.50 | 2.62 | 18.93 | 42.64 | 38.44 | Franco limoso arcilloso |
| 56 | Es Pil-lari | Cultivo de frutales | 20.7 | 67.4 | 44.05 | 3.05 | 6.76 | 19.41 | 82.72 | 117.53 | 131.90 | 80.27 | 110.09 | 110.46 | 2.65 | 26.26 | 40.74 | 33.01 | Franco arcilloso |
| 57 | Can Pastilla | Cultivo abandonado | 88.3 | 28.8 | 58.55 | 11.66 | 15.61 | 31.80 | 97.51 | 113.73 | 113.32 | 87.33 | 98.37 | 85.98 | 2.60 | 60.12 | 31.16 | 8.73 | Franco arenoso |
| 58 | S'Aranjassa | Cultivo de secano | 53.3 | 61.6 | 57.45 | 3.70 | 6.77 | 33.01 | 90.32 | 119.37 | 130.91 | 87.10 | 111.80 | 98.42 | 2.58 | 20.84 | 46.02 | 33.14 | Franco arcilloso |
| 59 | S'Aranjassa | Cultivo de regadío | 84 | 125.1 | 104.55 | 22.13 | 28.58 | 46.40 | 131.73 | 126.60 | 132.30 | 107.86 | 98.46 | 90.37 | 2.58 | 9.22 | 40.08 | 50.70 | Arcilloso limoso |
| 60 | S'Aranjassa | Cultivo barbecho | 40.3 | 27.9 | 34.10 | 30.05 | 22.94 | 37.75 | 122.70 | 138.94 | 161.09 | 94.35 | 113.01 | 116.94 | 2.63 | 11.08 | 44.23 | 44.69 | Arcilloso limoso |
| 61 | S'Aranjassa | Cultivo abandonado | 47 | 37.4 | 42.20 | 21.75 | 20.31 | 31.68 | 139.48 | 133.10 | 156.92 | 114.56 | 110.63 | 119.17 | 2.59 | 18.21 | 46.23 | 35.56 | Franco limoso arcilloso |
| 62 | S'Aranjassa | Cultivo de regadío | 69.5 | 14.9 | 42.20 | 14.07 | 14.74 | 41.77 | 113.20 | 117.78 | 135.08 | 99.24 | 102.65 | 95.28 | 2.61 | 9.73 | 36.24 | 54.03 | Arcilloso |
| 63 | S'Aranjassa | Cultivo barbecho | 114.1 | 63.6 | 88.85 | 20.34 | 14.97 | 31.45 | 124.22 | 117.24 | 121.50 | 103.22 | 101.97 | 92.43 | 2.64 | 11.40 | 44.02 | 44.57 | Limoso arcilloso |
| 64 | S'Aranjassa | Cultivo de regadío | 30.5 | 38.4 | 34.45 | 11.82 | 13.13 | 32.11 | 140.09 | 124.42 | 145.76 | 125.28 | 109.98 | 110.33 | 2.61 | 17.44 | 44.26 | 38.30 | Franco limoso arcilloso |
| 67 | S'Aranjassa | Cultivo abandonado | 4.1 | 10.7 | 7.40 | 8.64 | 9.61 | 18.17 | 129.06 | 149.24 | 200.35 | 118.80 | 136.16 | 169.55 | 2.63 | 15.96 | 47.88 | 36.16 | Franco limoso arcilloso |
| 68 | S'Aranjassa | Cultivo de secano | 60.5 | 54.6 | 57.55 | 3.43 | 1.82 | 26.42 | 102.14 | 101.48 | 141.73 | 98.75 | 99.67 | 112.11 | 2.57 | 25.21 | 51.49 | 23.30 | Franco limoso |
| 70 | S'Aranjassa | Cultivo abandonado | 26 | 14.1 | 20.05 | 1.00 | 0.90 | 9.30 | 108.23 | 149.76 | 190.10 | 107.16 | 148.42 | 173.93 | 2.69 | 43.48 | 40.22 | 16.30 | Franco |
| 72 | Sa Casa Blanca | Zona verde / parque | 13.4 | 14 | 13.70 | 11.68 | 11.78 | 36.14 | 120.49 | 125.72 | 166.48 | 107.89 | 112.47 | 122.29 | 2.54 | 10.61 | 50.69 | 38.70 | Franco limoso arcilloso |
| 74 | Sa Casa Blanca | Cultivo barbecho | 5.3 | 6.2 | 5.75 | 13.99 | 9.26 | 18.08 | 142.79 | 115.87 | 162.17 | 125.27 | 106.05 | 137.34 | 2.59 | 4.04 | 45.05 | 50.91 | Limoso arcilloso |
| 75 | Ctra. Casa Blanca | Cultivo de regadío | 63.6 | 30.7 | 47.15 | 4.92 | 2.75 | 26.33 | 118.98 | 121.84 | 170.37 | 113.40 | 118.58 | 134.86 | 2.61 | 16.71 | 56.82 | 26.47 | Franco limoso |
| 76 | Sa Casa Blanca | Cultivo de regadío | 41 | 31 | 36.00 | 8.26 | 2.51 | 13.36 | 119.86 | 106.21 | 89.66 | 110.71 | 103.61 | 79.09 | 2.61 | 14.95 | 56.05 | 29.01 | Franco limoso arcilloso |
| 82 | Sant Jordi | Cultivo de regadío | 54.3 | 57.7 | 56.00 | 17.32 | 20.28 | 35.18 | 105.88 | 131.10 | 151.90 | 90.25 | 109.00 | 112.37 | 2.49 | 24.34 | 56.50 | 19.16 | Franco limoso |
| 83 | Sant Jordi | Cultivo de regadío | 37.2 | 45.5 | 41.35 | 9.94 | 10.53 | 14.98 | 147.27 | 158.77 | 158.81 | 133.96 | 143.64 | 138.12 | 2.63 | 19.77 | 51.13 | 29.10 | Franco limoso arcilloso |

| Punto | Zona | Uso del suelo | Kfs A (mm/h) | Kfs B (mm/h) | K media (mm/h) | Humedad A % | Humedad B % | Humedad SAT % | Peso Húmedo A (g) | Peso Húmedo B (g) | Peso Húmedo SAT (g) | Peso Seco A (g) | Peso Seco B (g) | Peso seco SAT (g) | Densidad Real A (g/cm3) | ARENA A (%) | LIMO A (%) | ARCILLA A (%) | USDA |
|-------|-------------------|---------------------|--------------|--------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------|------------|---------------|-------------------------|
| 84 | Ctra. Casa Blanca | Cultivo de secano | 61.1 | 70.3 | 65.70 | 12.46 | 13.73 | 26.73 | 157.13 | 152.52 | 173.67 | 139.72 | 134.11 | 137.04 | 2.63 | 21.38 | 50.80 | 27.82 | Franco arcilloso |
| 86 | Coll d'en Rabassa | Cultivo abandonado | 132.6 | 48.6 | 90.60 | 10.56 | 7.73 | 25.54 | 119.69 | 134.84 | 150.67 | 108.26 | 125.17 | 120.02 | 2.60 | 33.27 | 36.93 | 29.81 | Franco arcilloso |
| 87 | Son Ferriol | Cultivo de secano | 26.7 | 45 | 35.85 | 7.66 | 9.15 | 21.20 | 135.99 | 132.02 | 163.82 | 126.31 | 120.95 | 135.16 | 2.61 | 13.26 | 42.41 | 44.33 | Limoso arcilloso |
| 89 | Ctra. Puntiró | Cultivo de secano | 29.8 | 36.9 | 33.35 | 3.23 | 3.94 | 20.11 | 87.34 | 100.00 | 134.69 | 84.61 | 96.21 | 112.14 | 2.61 | 17.52 | 46.98 | 35.50 | Franco limoso arcilloso |
| 90 | Ctra. Puntiró | Cultivo de secano | 38.8 | 49.1 | 43.95 | 6.37 | 2.55 | 20.92 | 103.88 | 88.18 | 137.28 | 97.66 | 85.99 | 113.53 | 2.63 | 14.36 | 60.03 | 25.61 | Franco limoso |
| 92 | Son Olms | Cultivo abandonado | 73.4 | 71.6 | 72.50 | 23.92 | 24.33 | 37.79 | 109.20 | 134.35 | 143.45 | 88.12 | 108.06 | 104.11 | 2.58 | 10.71 | 38.21 | 51.07 | Arcilloso |
| 93 | Ctra. Casa Blanca | Cultivo de regadío | 21.7 | 29.1 | 25.40 | 10.12 | 11.62 | 36.09 | 117.60 | 118.04 | 151.69 | 106.79 | 105.75 | 111.46 | 2.57 | 13.37 | 51.75 | 34.88 | Franco limoso arcilloso |
| 94 | Marratxí | Cultivo de frutales | 35.7 | 30 | 32.85 | 16.23 | 14.69 | 23.70 | 167.33 | 161.17 | 154.65 | 143.97 | 140.53 | 125.02 | 2.63 | 12.76 | 50.43 | 36.82 | Franco limoso arcilloso |
| 95 | Marratxí | Cultivo de frutales | 53.2 | 52.5 | 52.85 | 9.92 | 13.84 | 25.62 | 127.47 | 135.41 | 156.74 | 115.97 | 118.95 | 124.77 | 2.62 | 10.80 | 45.82 | 43.38 | Limoso arcilloso |
| 96 | Son Ametler | Cultivo abandonado | 74.4 | 40.3 | 57.35 | 11.14 | 8.92 | 18.76 | 164.85 | 153.50 | 180.72 | 148.33 | 140.93 | 152.17 | 2.63 | 18.57 | 49.28 | 32.14 | Franco limoso arcilloso |
| 97 | Es Pla de na Tesa | Cultivo abandonado | 106.3 | 87.5 | 96.90 | 10.57 | 2.99 | 17.24 | 142.41 | 105.29 | 158.92 | 128.80 | 102.23 | 135.55 | 2.63 | 30.88 | 42.92 | 26.20 | Franco |
| 98 | Es Pla de na Tesa | Cultivo en barbecho | 78.4 | 75.5 | 76.95 | 2.75 | 2.47 | 13.22 | 133.01 | 133.14 | 171.40 | 129.45 | 129.93 | 151.39 | 2.65 | 14.78 | 51.57 | 33.66 | Franco limoso arcilloso |
| 99 | Son Ametler | Cultivo de frutales | 70.3 | 94.6 | 82.45 | 4.49 | 4.78 | 15.20 | 123.39 | 120.23 | 148.33 | 118.09 | 114.75 | 128.76 | 2.61 | 11.58 | 41.24 | 47.18 | Limoso arcilloso |
| 100 | Ctra. Puntiró | Zona verde / parque | 14.9 | 15.7 | 15.30 | 1.68 | 0.73 | 13.76 | 119.46 | 120.73 | 181.78 | 117.49 | 119.85 | 159.79 | 2.61 | 42.70 | 50.83 | 6.46 | Franco limoso |
| 104 | Ctra. Puntiró | Cultivo de frutales | 39.1 | 42.6 | 40.85 | 20.35 | 17.34 | 22.72 | 146.78 | 150.52 | 175.01 | 121.96 | 128.28 | 142.61 | 2.65 | 7.81 | 55.87 | 36.32 | Franco limoso arcilloso |
| 105 | Sa Casa Blanca | Cultivo de regadío | 80.3 | 91.4 | 85.85 | 10.90 | 6.16 | 43.35 | 172.08 | 97.69 | 156.48 | 155.17 | 92.02 | 109.16 | 2.58 | 14.81 | 51.51 | 33.68 | Franco limoso arcilloso |
| 106 | Ctra. Casa Blanca | Cultivo abandonado | 46.9 | 26.9 | 36.90 | 16.92 | 17.15 | 31.08 | 148.89 | 139.36 | 167.43 | 127.34 | 118.96 | 127.73 | 2.61 | 8.31 | 50.07 | 41.62 | Limoso arcilloso |
| 107 | Ctra. Puntiró | Cultivo de secano | 19.8 | 21.7 | 20.75 | 15.27 | 11.79 | 17.36 | 131.21 | 155.73 | 168.08 | 113.83 | 139.30 | 143.22 | 2.64 | 27.48 | 44.96 | 27.56 | Franco arcilloso |
| 108 | Sant Jordi | Cultivo de frutales | 95.5 | 64.8 | 80.15 | 7.14 | 5.36 | 42.40 | 97.03 | 111.21 | 150.8 | 90.56 | 105.55 | 105.9 | 2.50 | 12.84 | 61.98 | 25.18 | Franco limoso |

| Punto | Zona | Uso del suelo | Kfs A (mm/h) | Kfs B (mm/h) | K media (mm/h) | Humedad A % | Humedad B % | Humedad SAT % | Peso Húmedo A (g) | Peso Húmedo B (g) | Peso Húmedo SAT (g) | Peso Seco A (g) | Peso Seco B (g) | Peso seco SAT (g) | Densidad Real A (g/cm3) | ARENA A (%) | LIMO A (%) | ARCILLA A (%) | USDA |
|-------|-------------------|---------------------|--------------|--------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------|------------|---------------|-------------------------|
| 109 | Sant Jordi | Cultivo abandonado | 48.2 | 55.1 | 51.65 | 1.75 | 2.13 | 24.90 | 125.31 | 110.01 | 165.5 | 123.15 | 107.72 | 132.51 | 2.61 | 17.99 | 53.86 | 28.15 | Franco limoso arcilloso |
| 111 | El Arenal | Cultivo de secano | 53.1 | 29.5 | 41.30 | 7.13 | 5.78 | 25.10 | 112.64 | 141.24 | 172.98 | 105.14 | 133.52 | 138.27 | 2.61 | 33.41 | 42.76 | 23.83 | Franco |
| 112 | Son Banya | Cultivo abandonado | 79.6 | 72.6 | 76.10 | 12.20 | 10.69 | 25.43 | 147.23 | 142.27 | 181.49 | 131.22 | 128.53 | 144.69 | 2.60 | 11.99 | 45.32 | 42.69 | Limoso arcilloso |
| 113 | Son Banya | Cultivo de frutales | 49.1 | 35.4 | 42.25 | 4.09 | 2.11 | 25.18 | 117.48 | 118.56 | 148.25 | 112.86 | 116.11 | 118.43 | 2.63 | 14.28 | 52.31 | 33.41 | Franco limoso arcilloso |
| 114 | Son Banya | Cultivo de secano | 90.8 | 84.3 | 87.55 | 6.96 | 6.84 | 32.12 | 123.16 | 112.29 | 162.79 | 115.15 | 105.1 | 123.21 | 2.61 | 16.44 | 45.90 | 37.66 | Franco limoso arcilloso |
| 115 | Sa Casa Blanca | Cultivo de secano | 34.1 | 60.8 | 47.45 | 2.26 | 2.14 | 16.35 | 107.11 | 119.90 | 138.25 | 104.74 | 117.39 | 118.82 | 2.62 | 19.42 | 45.78 | 34.80 | Franco limoso arcilloso |
| 116 | Coll d'en Rabassa | Cultivo de frutales | 38.2 | 29.5 | 33.85 | 1.68 | 2.03 | 23.75 | 114.23 | 118.88 | 150.20 | 112.34 | 116.52 | 121.37 | 2.58 | 27.29 | 40.42 | 32.29 | Franco arcilloso |
| 117 | S'Aranjassa | Cultivo de secano | 29.2 | 45.5 | 37.35 | 4.37 | 4.76 | 29.42 | 102.46 | 140.3 | 148 | 98.17 | 133.92 | 114.36 | 2.63 | 21.98 | 42.44 | 35.58 | Franco arcilloso |
| 118 | S'Aranjassa | Cultivo de secano | 30.4 | 47.7 | 39.05 | 3.77 | 2.94 | 29.99 | 140.77 | 127.98 | 166.15 | 135.66 | 124.32 | 127.82 | 2.62 | 16.37 | 57.33 | 26.30 | Franco limoso |
| 119 | S'Aranjassa | Cultivo abandonado | 9.6 | 18.6 | 14.10 | 2.86 | 2.62 | 19.34 | 143.47 | 122.02 | 165.67 | 139.48 | 118.91 | 138.82 | 2.60 | 30.35 | 42.11 | 27.54 | Franco arcilloso |
| 120 | Sa Casa Blanca | Cultivo de regadío | 27.8 | 23.5 | 25.65 | 24.15 | 28.80 | 61.89 | 152.02 | 110.9 | 131.96 | 122.45 | 86.1 | 81.51 | 2.58 | 5.31 | 42.04 | 52.65 | Limoso arcilloso |
| 121 | Son Banya | Cultivo de regadío | 28.5 | 62.5 | 45.50 | 6.29 | 18.61 | 31.74 | 98.32 | 139.65 | 165.71 | 92.5 | 117.74 | 125.79 | 2.59 | 11.13 | 40.58 | 48.29 | Limoso arcilloso |
| 122 | El Arenal | Cultivo abandonado | 48.4 | 81.4 | 64.90 | 9.01 | 20.79 | 22.68 | 140.45 | 167.33 | 165.95 | 128.84 | 138.53 | 135.27 | 2.68 | 59.86 | 27.82 | 12.32 | Franco arenoso |
| 123 | El Arenal | Cultivo abandonado | 92.0 | 147.1 | 119.55 | 13.25 | 34.33 | 32.69 | 121.31 | 157.00 | 135.65 | 107.12 | 116.88 | 102.23 | 2.63 | 68.08 | 20.94 | 10.98 | Franco arenoso |
| 124 | Es Pil-lari | Cultivo de secano | 36.1 | 86.4 | 61.25 | 15.53 | 29.15 | 24.47 | 125.7 | 151.54 | 193.16 | 108.8 | 117.34 | 155.18 | 2.58 | 22.63 | 36.59 | 40.78 | Arcilloso |
| 125 | Es Pil-lari | Cultivo abandonado | 121.9 | 90.5 | 106.20 | 17.46 | 36.83 | 22.93 | 144.47 | 135.61 | 158.04 | 123 | 99.11 | 128.56 | 2.59 | 13.97 | 38.39 | 47.64 | Arcilloso |
| 126 | S'Aranjassa | Cultivo abandonado | 29.8 | 20.5 | 25.15 | 20.06 | 14.28 | 26.86 | 157.66 | 138.61 | 163.63 | 131.32 | 121.29 | 128.98 | 2.61 | 15.60 | 41.15 | 43.25 | Limoso arcilloso |
| 127 | Ctra. Casa Blanca | Cultivo de frutales | 29.2 | 19.4 | 24.30 | 7.46 | 30.27 | 27.83 | 122.14 | 132.86 | 134.91 | 113.66 | 101.99 | 105.54 | 2.58 | 18.18 | 42.99 | 38.83 | Franco limoso arcilloso |
| 128 | Son Banya | Cultivo de regadío | 39.3 | 37.7 | 38.50 | 11.98 | 11.61 | 35.51 | 102.52 | 113.26 | 150.84 | 91.55 | 101.48 | 111.31 | 2.54 | 11.09 | 48.25 | 40.66 | Limoso arcilloso |

| Punto | Zona | Uso del suelo | Kfs A (mm/h) | Kfs B (mm/h) | K media (mm/h) | Humedad A % | Humedad B % | Humedad SAT % | Peso Húmedo A (g) | Peso Húmedo B (g) | Peso Húmedo SAT (g) | Peso Seco A (g) | Peso Seco B (g) | Peso seco SAT (g) | Densidad Real A (g/cm3) | ARENA A (%) | LIMO A (%) | ARCILLA A (%) | USDA |
|-------|-------------------|---------------------|--------------|--------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------|------------|---------------|-------------------------|
| 129 | Sa Casa Blanca | Cultivo abandonado | 22.7 | 9.8 | 16.25 | 9.41 | 5.63 | 28.78 | 103.03 | 110.40 | 137.15 | 94.17 | 104.52 | 106.50 | 2.59 | 5.75 | 55.16 | 39.09 | Franco limoso arcilloso |
| 130 | Es Pla de na Tesa | Cultivo abandonado | 109.1 | 102.3 | 105.70 | 9.89 | 29.88 | 37.65 | 143.41 | 148.63 | 138.28 | 130.5 | 114.44 | 100.46 | 2.48 | 40.47 | 40.84 | 18.70 | Franco |
| 131 | Son Bonet | Zona verde / parque | 11.2 | 24.8 | 18.00 | 2.93 | 32.15 | 25.61 | 87.17 | 151.13 | 144.65 | 84.69 | 114.36 | 115.16 | 2.62 | 18.27 | 60.97 | 20.77 | Franco limoso |
| 132 | Son Ametler | Cultivo en barbecho | 109.0 | 60.6 | 84.80 | 6.13 | 32.69 | 28.14 | 93.51 | 153.61 | 177.29 | 88.11 | 115.77 | 138.36 | 2.54 | 13.61 | 45.50 | 40.89 | Limoso arcilloso |
| 133 | L' Hostalot | Cultivo abandonado | 72.2 | 47.8 | 60.00 | 4.54 | 17.17 | 14.63 | 169.9 | 140.94 | 162.08 | 162.52 | 120.29 | 141.39 | 2.65 | 12.36 | 61.29 | 26.36 | Franco limoso |