



## TÍTULO

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA EN EL  
ARROYO LOS FRAILES (AZNALCÓLLAR, SEVILLA)**

## AUTORA

**Regla María Díaz Racero**

	<b>Esta edición electrónica ha sido realizada en 2022</b>
Tutores	Dr. D. Manuel Olías Álvarez ; Dr. D. Enrique Olivas Méndez
Instituciones	Universidad Internacional de Andalucía ; Universidad de Huelva
Curso	<i>Máster en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales(2020/21)</i>
©	Regla María Díaz Racero
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha documento	2021



**Atribución-NoComercial-SinDerivadas  
4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)**

Para más información:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.en>

# **Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)**

**TRABAJO DE FIN DE MÁSTER**

**Regla María Díaz Racero**

Universidad Internacional de Andalucía

**Tutores:** Dr. Manuel Olías Álvarez

Enrique Olivas Méndez

## **Resumen:**

Este trabajo ha consistido en un estudio hidrológico de la subcuenca del arroyo de Los Frailes, situado al suroeste de la Península Ibérica (Aznalcóllar, Sevilla), con el fin de analizar la relación entre la precipitación y la escorrentía superficial. Inicialmente se ha realizado la caracterización de la subcuenca con el análisis de datos de usos del suelo, relieve, geología, clima e hidrología de la zona. A partir del registro continuo del nivel del agua mediante data-loggers en dos puntos (EAF-1 y EAF-3), junto con el estudio de las curvas de gastos obtenidas experimentalmente en otros puntos cercanos (ALF-B y ALF-A), se ha obtenido la evolución de los caudales del arroyo de Los Frailes. Con los resultados de los caudales se ha realizado la correlación con las precipitaciones, en los que se puede observar dos crecidas importantes en cada punto. El desfase entre las precipitaciones y picos de caudal varió entre 4 y 16 horas. Las correlaciones entre los datos horarios de precipitación y caudal son muy bajas, incluso teniendo en cuenta el desfase entre las dos variables. Se han intentado mejorar las correlaciones utilizando las precipitaciones previas acumuladas en distintos intervalos de tiempo. Los mejores resultados se han conseguido correlacionando los caudales horarios con la precipitación acumulada modulada con unos coeficientes que van disminuyendo a medida que las precipitaciones previas ocurren con un mayor desfase con el caudal. No obstante, haría falta mejorar la metodología y tener en cuenta ciertos parámetros como la humedad del suelo previa a las precipitaciones, así como ampliar las series de caudales y precipitaciones en futuros trabajos.

**Palabras clave:** Hidrología, arroyo Los Frailes, caudales, precipitaciones

## **Abstract:**

This work has consisted in a hydrological study of “the sub-basin of Los Frailes’s stream”, located in the southwest of the Iberian Peninsula (Aznalcóllar, Sevilla), with the objective of analyse the relation between precipitation and surface run off. Initially, the characterization of the sub-basin was carried out using data from the analysis of the soil, relief, geology, climate and hydrology of the area. Afterwards, based on the continuous record of the water level with data-loggers in two points (EAF-1 and EAF-3), in conjunction with the study of the flow curves got experimentally at other nearby points (ALF-B and ALF-A), the evolution of the flows of Los Frailes’s stream has been obtained. The correlation with precipitation has been made with the flow results, in which two significant floods can be observed at each point. The time lag between precipitation and peak flows varied between 4 and 16 hours. Correlations between hourly data precipitation and flow data are very low, even keeping it in mind the gap between the two variables. Correlations have been improved by using previous precipitation accumulated at different time intervals. The best results have been obtained with the

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)

correlation between hourly flows and modulated cumulative precipitation, with the coefficients decreasing as the previous precipitation occurs more out of phase with the flow. However, it would be necessary to improve the methodology and consider parameters as soil moisture before the precipitation, just as increase flows series and precipitation in future works.

**Key words:** Hydrology, Los Frailes stream, flows, precipitation.

# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1.	Antecedentes .....	1
1.2.	Objetivos .....	1
<b>2.</b>	<b>ZONA DE ESTUDIO</b> .....	<b>2</b>
2.1.	Contexto geográfico .....	2
2.2.	Contexto geológico .....	3
2.3.	Relieve .....	9
2.4.	Uso del suelo .....	11
2.5.	Climatología .....	12
2.6.	Hidrología .....	13
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>16</b>
3.1.	Datos utilizados .....	16
	- Precipitaciones .....	16
	- Niveles y caudales del arroyo de Los Frailes .....	17
	- Capas de información usadas .....	18
3.2.	Tratamiento de los datos .....	19
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>19</b>
4.1.	Precipitaciones .....	19
	- Precipitación media en la zona .....	19
	- Evolución de las precipitaciones en 2019/2020 .....	21
4.2.	Curva de gastos .....	22
4.3.	Correlación entre precipitación y caudales .....	27
	4.3.1. Punto ALF-A .....	27
	4.3.2. Punto ALF-B .....	34
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>40</b>
	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>42</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Este trabajo de fin de máster se ha realizado en el marco del Máster de Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales, cursado en la Universidad Internacional de Andalucía (UNIA), en la sede de La Rábida. Para este proyecto se ha contado con la colaboración de la empresa Minera Los Frailes S.L., donde se realizaron las prácticas del Grado de Geología durante un periodo de seis meses, concretamente en el departamento de hidrogeología. El arroyo de los Frailes es tributario del río Agrío, que a su vez tributa al río Guadiamar y este al Guadalquivir, a través de la Marisma de Doñana. Los cursos de los Frailes y Agrío están afectados por la actividad minera de Aznalcóllar-Frailes geográficamente se encuentra dentro del término municipal de Aznalcóllar (Sevilla), a 1.5 km al este del núcleo urbano, a unos 12 km del segundo municipio más cercano, Gerena, y a 19 km de Sanlúcar la Mayor.

Los periodos más importantes de actividad minera se concentran en la época industrial (1850-1918), y en la etapa final de su actividad en la época contemporánea (1960-2001), en el que se explotaron los yacimientos de sulfuros polimetálicos mediante minería a cielo abierto, creando la corta de Aznalcóllar y la corta de Los Frailes. Éstas afectan al drenaje superficial de la red fluvial del entorno por el desnivel que presentan. El 25 de abril de 1998 se produjo el accidente de la balsa de lodos. Tras prácticamente un año de inactividad, en 1999 se reinició la actividad minera con el tratamiento de 1.86 millones de toneladas de mineral (Gómez de las Heras, 2001). Como consecuencia de la rotura, se produjo un vertido de 6 hm<sup>3</sup> de aguas ácidas y lodos con elevadas concentraciones de metales pesados que se extendieron y depositaron aguas abajo siguiendo el trazado del río Guadiamar (Aliaga et al., 2004). Esto dio lugar a la paralización de la explotación minera en 2001 y que la corta de Frailes quedara inactiva (Aliaga et al., 2004). La corta de Aznalcóllar ofrecía un hueco suficiente para el almacenamiento de la totalidad de las tierras y lodos procedentes de las labores de limpieza de los terrenos afectados (Aliaga et al., 2004).

### 1.2. Objetivos

Minera Los Frailes S.L., está interesada en realizar un estudio de detalle de la relación entre las precipitaciones y el caudal en el arroyo de Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla). Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo es investigar la correlación entre la lluvia y el caudal de este arroyo. Este objetivo general se puede desglosar en los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar la información hidrológica existente sobre la subcuenca del arroyo de Los Frailes

- Investigar la evolución de las precipitaciones y caudales en este arroyo durante el 2020.
- Analizar las correlaciones entre ambos parámetros, con el fin de disponer de información para predecir los caudales que se pueden generar en el arroyo de Los Frailes con precipitaciones futuras.

## **2. ZONA DE ESTUDIO**

### **2.1. Contexto geográfico**

La subcuenca del arroyo de Los Frailes pertenece a la cuenca del río Guadiamar, situada al norte de las provincias de Sevilla y Huelva. El nacimiento del Guadiamar se encuentra cerca del municipio del Castillo de las Guardas. El curso del Guadiamar se puede dividir en tres tramos de norte a sur: la sierra, la campiña y la marisma. La dirección inicial del Guadiamar es sureste y finaliza con una dirección predominante Norte-Sur. El río Guadiamar atraviesa los términos municipales de Aznalcóllar, Gerena, Sanlúcar la Mayor, Olivares, Banacazón y Aznalcázar. La desembocadura natural del Guadiamar estaba en Doñana, actualmente el río finaliza su recorrido en una zona de marismas, para satisfacer las necesidades de regadío ha sido desviado de manera artificial. Concretamente desemboca en La Puebla de Río (Sevilla), confluyendo con el río Guadalquivir, siendo la desembocadura del mismo en el Océano Atlántico.

La subcuenca del arroyo de Los Frailes se localiza entre dos términos municipales de la provincia de Sevilla, al este de Aznalcóllar y al este de Sanlúcar La Mayor. El arroyo de Los Frailes se encuentra al norte de Aznalcóllar, y confluye en el río Agrio, afluente a su vez del Guadiamar (Fig. 1).



**Figura 1:** Mapa de ubicación geográfica de la zona de estudio. Donde se observa en el mapa inferior izquierdo (1.A) en rojo la provincia de Sevilla, y con su ampliación de la zona de estudio (1.B), en rojo se muestra donde está ubicada la zona de actividad minera. (Fuente: Junta de Andalucía).

## 2.2. Contexto geológico

### Geología regional

La zona de estudio corresponde al Macizo Ibérico, este está dividido en seis grandes zonas descritas por Lotze (1945). Dentro de esta se encuentran tres formaciones, concretamente la más meridional del Cinturón Varisco Europeo, siendo la Faja Pirítica Ibérica, donde se centra este trabajo, esta queda delimitada por el norte el Dominio de Pulo do Lobo y al Sur por el Dominio SW portugués (Alonso et al., 2012).

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

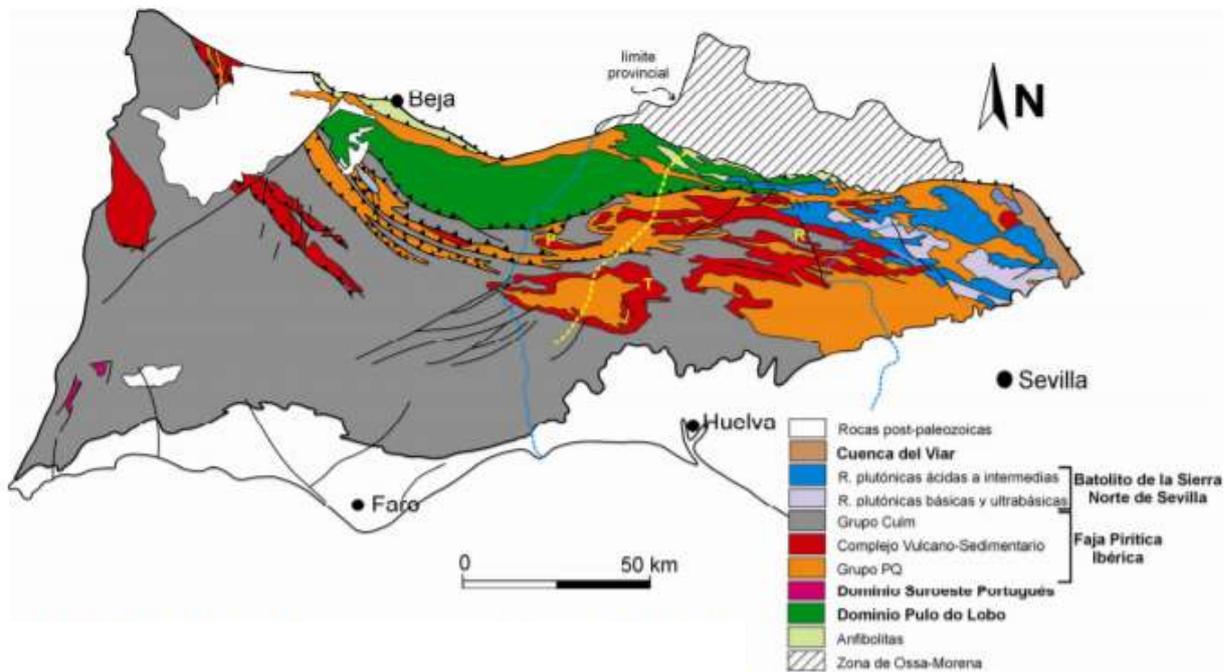


Figura 2: Esquema geológico de la Zona Surportuguesa (Fuente: Alonso et al., 2012).

En este estudio las formaciones que aparecen de norte a sur son: la Zona de Ossa-Morena (ZOM), los materiales de la Zona Surportuguesa, centrándose en la zona más septentrional, y al sur de estos aparecen materiales de edad miocena, pertenecientes a la Depresión del Guadalquivir. La subcuenca también está compuesta por materiales de origen fluvial, pertenecientes al cuaternario, además es importante destacar la presencia de materiales de origen antrópico en el entorno.

La Zona de Ossa Morena está constituida por rocas del Proterozoico terminal al Carbonífero, que durante la Orogenia Varisca amalgamó con la zona Centro Ibérica y con la zona Surportuguesa (Martín y Parras, 2011). En la zona norte afloran rocas con distintos grados de metamorfismo.

### Zona Sudportuguesa

La Zona Sudportuguesa se subdivide en cuatro dominios, descritos por Oliveira (1990), de Norte a Sur, son cinturón ofiolítico Beja-Acebucho, Antiforme del Pulo do Lobo, Faja Pirítica Ibérica y Flysh de Bajo Alentejo. A continuación, se describirá cada uno de ellos:

#### Cinturón ofiolítico Beja-Acebucho

Esta formación colinda con la Zona de Ossa Morena, recibe su nombre porque es una zona donde hubo un choque de placas, cuando se amalgamaron las placas. Corresponde a un cinturón de anfibolitas que presenta una organización litológica interna que incluye, de abajo hacia arriba: metaperidotitas y piroxenitas acumuladas,

gabros, trondjemitas , anfibolitas y esquistos verdes (Bastida et al., 2008), Las estructuras de deformación son D1 (Devónico temprano) corresponde a obducción de ofiolita a alta temperatura, D2 (Devónico medio) relacionada con el cizallamiento de la zona y D3 esta última etapa provocó que se reactivaran las estructuras de la D2, provocado por un empuje siniestral hacia el suroeste (Bastida et al. 2008).

### **Antiforme del Pulo do Lobo**

La Unidad del Pulo do Lobo aflora al Sur del límite entre las Zonas de Ossa-Morena y Sudportuguesa, en el SO del Macizo Ibérico. Compuesto mayoritariamente por rocas de naturaleza metasedimentaria (pelitas, areniscas y grauvacas) con intercalaciones de rocas ígneas (Azor Pérez et al., 2012). Se tratan de rocas con una intensa deformación tectónica, interpretadas como un prisma de acreción posiblemente provocado por una zona de subducción, de edad Devónico- Carbonífera (Azor Pérez, A. et al 2012).

### **Faja Pirítica Ibérica**

La FPI está situada en el SO de la Península Ibérica, dentro de la Zona Sudportuguesa (IGME, 1982). Tiene una extensión de unos 250 km de largo y 50 km de ancho, extendiéndose desde el sur de Portugal hasta el norte de Sevilla. Los materiales de la Faja Pirítica comprenden una edad desde el Devónico al Carbonífero (IGME, 1982). Geográficamente situada entre las estribaciones meridionales de Sierra Morena y la depresión terciaria del Guadalquivir, constituye una unidad geomorfológica bien diferenciada pues, a excepción de algunas sierras en la parte norte, puede considerarse en general como una penillanura inclinada hacia el sur y en actual proceso de rejuvenecimiento (IGME, 1982).

La FPI está compuesta por tres dominios litoestratigráficos, los cuales se encuentran cabalgándose entre sí, de más antiguo a más joven son: Dominio PQ, Complejo Vulcano-Sedimentario y Culm.

### **Flysch del Bajo Alentejo**

Zona perteneciente a las unidades alóctonas de la Faja Pirítica Ibérica. De edad comprendida entre el Viseense Superior, con materiales pizarrosos pertenecientes a la Formación Minera, los cuales se apoyan de forma concordante sobre el Culm, y el Westfaliense, constituye una secuencia turbidítica de aguas profundas, que localmente puede llegar a tener una potencia de 5 km, formado con materiales arenosos conocido como la Formación Brejeira (Oliveira et al., 2013).

## ESTRATIGRAFÍA DE LA FAJA PIRÍTICA

### Grupo PQ

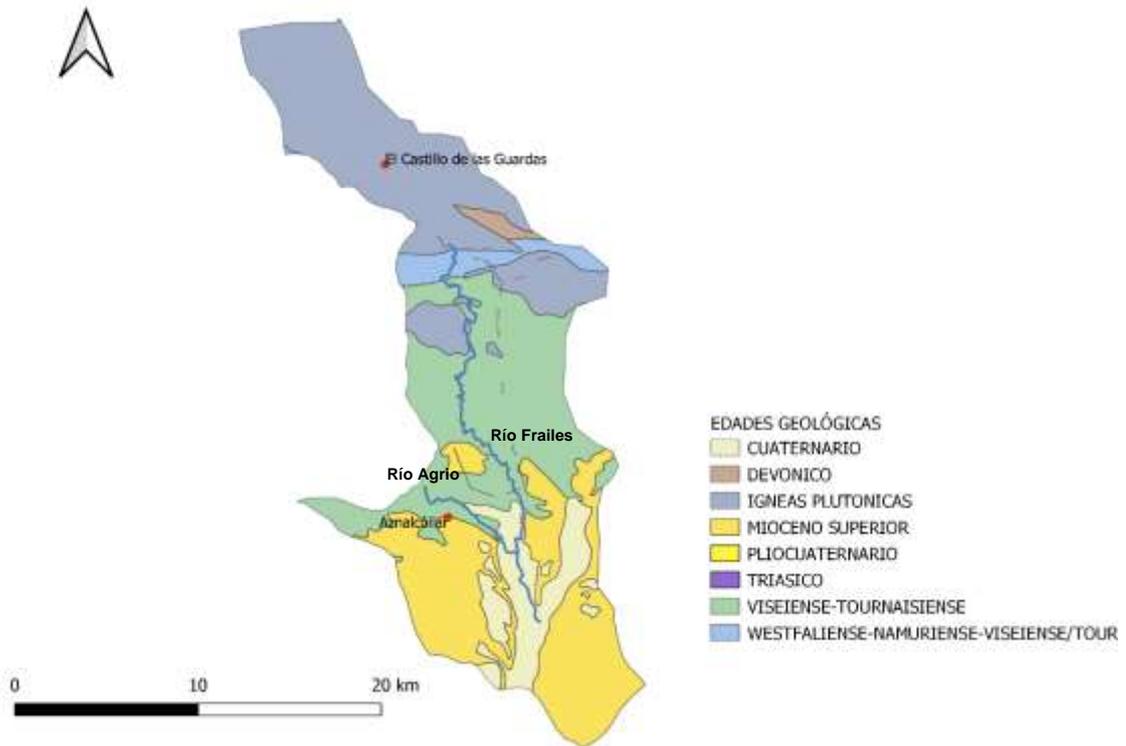
Formación más antigua, formada por la alternancia de pizarras negras con intercalaciones de areniscas cuarzosas, con mayor presencia de pizarras. Las potencias mínimas estimada de esta formación son de unos 2000 m, mientras que las cuarcitas disminuyen su potencia en dirección este, llegando a 1 m de potencia en Frailes (Custodio et al., 2001). Pizarras y cuarcitas de edad comprendida entre el Devónico medio a Devónico superior (Fameniense tardío) (Alonso et al., 2012). Los datos de campo han puesto de manifiesto que los niveles de cuarcitas de esta unidad aumentan de potencia y de tamaño de grano hacia techo, donde las pizarras llegan casi a desaparecer (Alonso et al., 2012). Caracterizada por la presencia de estructuras sedimentarias (como laminaciones cruzadas y ripples).

### Complejo Vulcano Sedimentario (CVS)

Formados por rocas de origen volcánico, alternadas por estadios de rocas de composición ácidas y básicas. Las composiciones ácidas suelen ser riolitas y dacitas, mientras las rocas básicas son predominantemente basaltos. Además de rocas sedimentarias como pizarras. También se encuentran depósitos de sulfuros masivos, ubicados a techo de los materiales ácidos, compuesto por minerales como pirita, calcopirita, galena, esfalerita y goethita. De edad Fameniense tardío Viseense medio-superior (Alonso et al., 2012). Presentan potencias muy variables, desde cero a miles de metros. Los sulfuros masivos de esta formación han sido explotados por la minería en Aznalcóllar, desde edades como el calcolítico, de manera más intensa en la revolución

La deformación varisca comprende tres etapas principales. La primera etapa, produjo las principales estructuras regionales y fue responsable de la deformación de piel fina con pliegues y empujes asimétricos. La segunda etapa dobló suavemente la foliación F1 principal, con vertical, planos axiales Norte-Sur. La tercera etapa de deformación resultó en varios sistemas de fallas, que modificaron localmente la estructura de los sulfuros masivos (Álmodovar et al., 2019).

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)



**Figura 3:** Cartografía geológica de la subcuenca del arroyo de Los Frailes y su confluencia con el río Agrio. (Fuente capas: Junta de Andalucía, Rediam.)

### Grupo Culm

Compuestos por rocas sedimentarias, como pizarras y grauvacas de edad Viseiense inferior a superior, marcadas por el final de la sedimentación en el Carbonífero. Serie turbidítica tipo Flysh sinorogénico (Moreno, 1993). Compuestas por una formación turbidítica de facies Culm. Se pueden encontrar potencias de hasta unos 3000 metros.

### TECTÓNICA DE LA FAJA PIRÍTICA

La deformación de la Zona Surportuguesa se produjo en la Orogenia Varisca (Carbonífero), el proceso llevó a la formación de importantes estructuras geológicas, como un cinturón de pliegues y cabalgamientos, tipo "Thin-skinned", además de un periodo de deformación alpina, en el que se formaron las cuencas Mesozoico-Terciarias. Los pliegues y cabalgamientos forman estructuras kilométricas, de vergencia al S-SW (Quesada et al., 1997). Zona compuesta por importantes cabalgamientos regionales superponen rocas del Grupo PQ (Devónico Superior)

sobre rocas CVS (mayormente del carbonífero), así como las rocas del denominado Pulo do Lobo también superponen a las rocas de la FPI (Alonso et al., 2012). Las directrices estructurales de los cabalgamientos son ONO-ESE (Alonso et al., 2012). La mayor parte de la deformación tuvo lugar parte en el Carbonífero, migrando de norte a sur, en relación con la convergencia entre dos fragmentos corticales, por una parte, la Zona Surportuguesa y por otra la Zona de Ossa-Morena (Alonso et al., 2012).

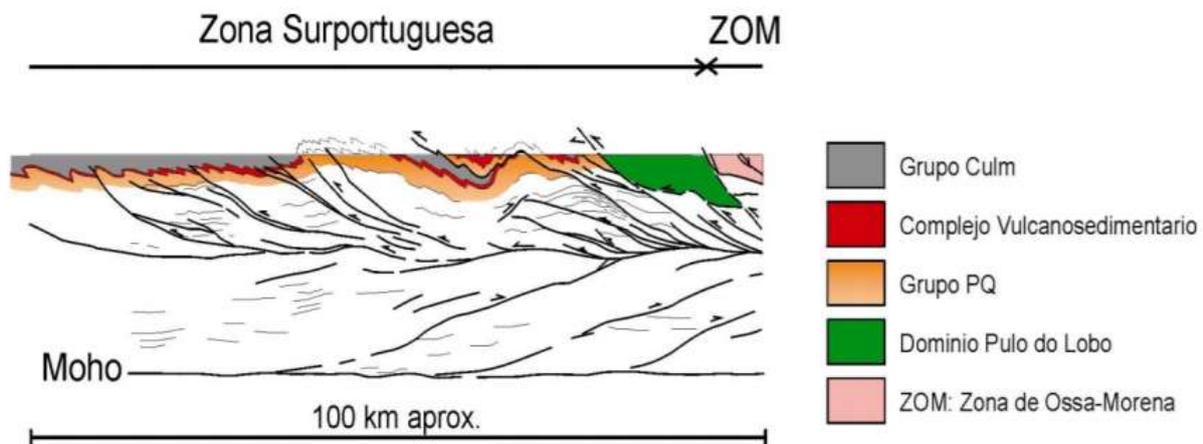


Figura 4: Corte general de la Zona Surportuguesa, a escala cortical. (Fuente Alonso et al., 2012.)

Al sur, en la banda meridional de la FPI, los pliegues de primera fase son inclinados o tumbados, mientras que los pliegues de segunda fase tienden a ser pliegues rectos (Alonso et al., 2012).

## MATERIALES MIOCENOS Y CUATERNARIOS

Sobre los materiales paleozoicos aparecen de manera discordante calcarenitas ferruginosas, conglomerados, arenas y areniscas, de edad Messiniense, con una potencia de 25 a 30 metros, constituido por un conjunto de brechas calcáreas a conglomerados que engloban cantos de pizarras, rocas volcánicas y cuarzo. Lateralmente pasan a calizas brechoideas y calizas arenosas (biomicritas) (Borja et al., 2001). Se tratan de depósitos litorales. Esta unidad comprende al acuífero de Niebla Posadas.

Al sur de la zona de estudio afloran margas azules. Se trata de margas masivas. En ocasiones presentan hidróxidos de hierro o inclusiones de pirita. Lo componen materiales de edad Messiniense, los cuales se interpretan como depósitos de plataforma abierta (Borja et al., 2001).

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

Las unidades que aparecen en la zona de estudio pertenecientes al Cuaternario son terrazas aluviales. De edad Pleistoceno-Holoceno, incluye tres unidades: T<sub>3</sub> formada por arcillas rojas y marrones, con arenas, acumulaciones de gravas y cantos cuarcíticos, mientras que las T<sub>2</sub> y T<sub>1</sub> están constituidas esencialmente por arenas y fracción limo arcilla con lentejones de gravas (Borja et al., 2001).

También es importante mencionar que el arroyo de Los Frailes atraviesa una zona con materiales antrópicos, escombreras creadas por la actividad minera de la zona (Aznalcóllar).

En la Figura 5 se puede observar que los materiales más abundantes de la zona de la subcuenca del arroyo de Los Frailes son pizarras y cuarcitas del grupo PQ, los siguientes más abundantes son los gabros, dioritas y tonalitas, del grupo CVS. Los materiales que se encuentran en menor abundancia en la zona de estudio son lavas, piroclastos, tobas y tufitas del CVS, calcarenitas, arenas y margas y los granitos situados en una pequeña zona septentrional de la subcuenca.



**Figura 5:** Mapa geológico de la subcuenca del Arroyo de Los Frailes. 1.-Lavas, piroclastos, tobas y tufitas (CVS), 2.-Gabros, dioritas, tonalitas (CVS), 3.-Granitos (ZOM), 4.- Pizarras y cuarcitas (PQ), 5.- calcarenitas, arenas, margas (Fuente capas: Junta de Andalucía, Rediam)

### 2.3. Relieve

Los mayores relieves de la cuenca del Guadiamar corresponden a la zona de su cabecera en Sierra Morena, y conforme avanzamos al Sur, otro dominio aparece con un menor relieve, la cuenca del Guadalquivir. En el perfil longitudinal del río encontramos un desnivel, entorno los 320 m. Respecto a su cuenca tiende a ser asimétrica, ya que los afluentes de la margen derecha son abundantes y alcanzan un

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

importante desarrollo (arroyos principales Cañaveroso, Crispinejo, de Los Frailes, Agrio, Ardachón, Alcarayón, etc.), los del margen izquierdo, y a excepción del Majaberraque, son escasos y de corto recorrido (Borja et al., 2001).



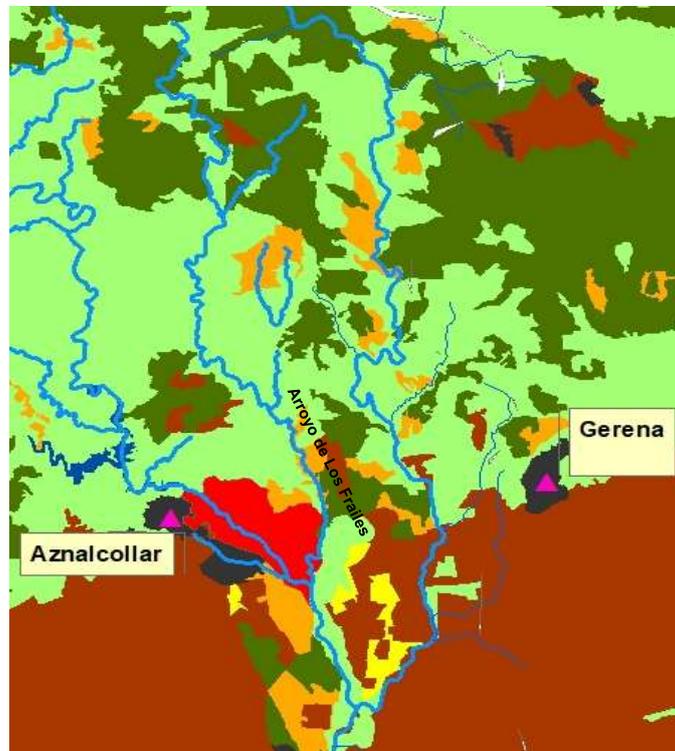
**Figura 6:** Red hidrográfica de la cuenca del río Guadiamar, ámbitos geográficos y principales vías de comunicación (Fuente: Borja et al., 2001).

Dentro de la cuenca del Guadiamar encontramos tres subcuencas principales: río Agrio (o Crispinejo), arroyo de Los Frailes y la zona alta del río Guadiamar, con los cauces orientados N a S (Borja et al, 2001). Este TFM se centrará en la zona de la subcuenca del arroyo de Los Frailes. La subcuenca del arroyo de Los Frailes, es simétrica, con una componente N-S. Cabe destacar que antes de confluir con el río

Agrio, pasa cerca de la corta de Los Frailes, que presenta una cota mínima de -170 m.s.n.m.

## 2.4. Uso del suelo

Los suelos de la zona de estudio tienen diferentes usos, los cuales se han representado en el mapa de la figura 7. Mediante un software de análisis espacial de datos se ha podido extraer de manera cuantitativa las áreas y los porcentajes de los distintos usos del suelo.



**Figura 7:** Mapa de los usos de suelo de la zona del Arroyo de Los Frailes. Marrón: terrenos de labor de secano, verde oscuro: bosques de frondosas y sistemas agroforestales, verde claro: matorrales esclerófilos, matorral boscoso y olivares, naranja: prados y praderas, gris oscuro: núcleos urbanos, rojo: suelos afectados por la actividad minera. (Fuente: Rediam)

Se puede observar que los principales usos del terreno son: tierras de labor de secano, bosques frondosos, matorrales esclerófilos, matorrales boscosos, olivares, prados, praderas y usos urbanos. Además, cabe destacar la zona de extracción minera de Aznaicóllar. En la tabla 1, en la cual se muestra como en una superficie total de 76 km<sup>2</sup>, del área de estudio, entorno a la subcuenca del arroyo de Los Frailes, los usos del suelo de menor a mayor extensión respectivamente, son prados y praderas con un 3% y con el mismo valor de campos de olivares y le siguen los pastizales naturales cada uno con 2 km<sup>2</sup> de extensión. Le sigue con un 4% las tierras de labor de secano,

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

con una extensión de 3 km<sup>2</sup>. Con un 12% bosques frondosos y con un área de 9 km<sup>2</sup>, y con una pequeña diferencia respecto con los matorrales esclerófilos, que tienen un área de 8 km<sup>2</sup>. Los dos usos que más destacan en la zona son sistemas agroforestales, con un 29 %. Por último, el valor que mayor presencia tiene en el área de estudio con un 37% y con 28 km<sup>2</sup>, son los matorrales boscosos en transición.

**Tabla 1:** Cuantificación de los diferentes usos de suelo en el arroyo de Los Frailes, tabla compuesta por los códigos de usos de la Junta de Andalucía, área que ocupa cada tipo de suelo y sus respectivos porcentajes (Fuente: Instituto de estadística y cartografía en Andalucía).

	Código uso	Área (km <sup>2</sup> )	%
Bosques de frondosas	311	9	12
Matorral boscoso de transición	324	28	37
Matorrales esclerófilos	323	8	11
Olivares	323	2	3
Pastizales naturales	321	2	3
Prados y Praderas	231	2	3
Sistemas agroforestales	244	22	29
Tierras de labor en secano	211	3	4
	Total (km <sup>2</sup> )	76	

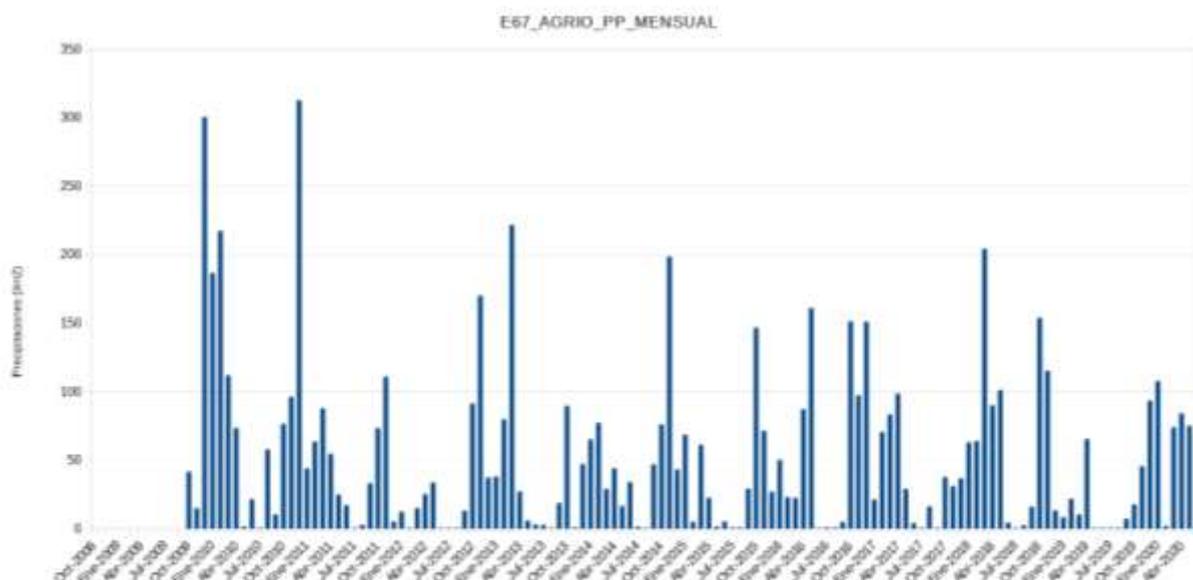
## 2.5. Climatología

La cuenca del Guadiamar presenta un clima mediterráneo subhúmedo de rasgos oceánicos, caracterizado por inviernos suaves y relativamente húmedos, en contraste de periodos más secos (Borja et al., 2001). Las temperaturas medias fluctúan entre los 9°C en enero, incluso llegando a los 0°C, mientras en verano se alcanzan fácilmente los 40 °C (Borja et al., 2001).

Respecto a las precipitaciones en zonas al Norte, como el Castillo de la Guardas, las medias son de 663 mm, mientras que más al Sur, en Sanlúcar la Mayor, son de 555 mm (Borja et al., 2001). Se aprecia un régimen pluviométrico irregular, con años húmedos y años más secos.

La estación meteorológica más cercana a la zona de estudio es la estación E-67, correspondiente al embalse del Agrio. En la Figura 8 los datos representados corresponden con el periodo de octubre 2009 a julio de 2020. La precipitación anual ronda entre los 400- 600 mm, con un máximo mensual de 312 mm en el mes de diciembre de 2010. Se pueden observar periodos más lluviosos que otros, siendo un clima que varía entre años secos y años más húmedos.

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

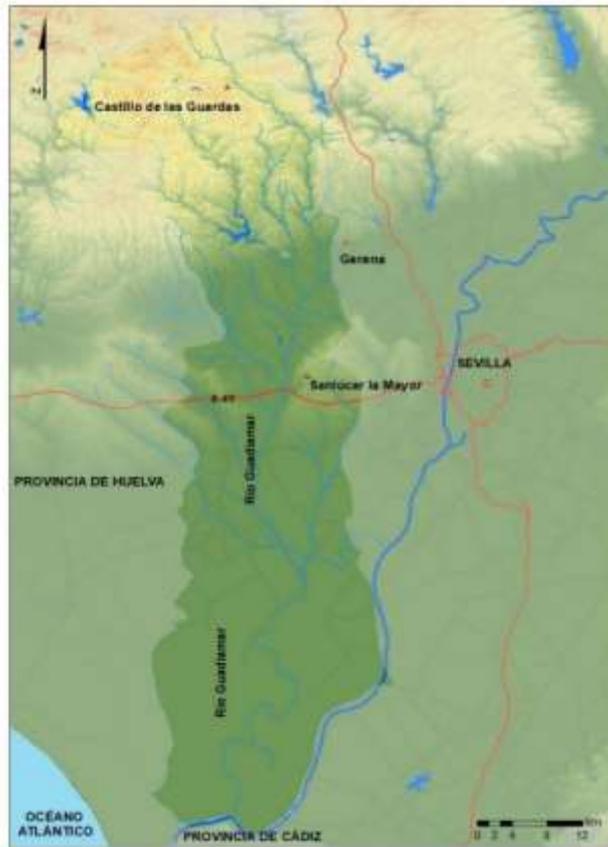


**Figura 8:** Evolución de la precipitación mensual en el embalse del Agrio (E67\_AGRIO durante el periodo 2009-2020 (Fuente: Sistema Automático de Información Hidrogeológica de la Cuenca del Guadalquivir -S.A.I.H.-).

### 2.6. Hidrología

La cuenca del Guadiamar tiene una extensión de 1880 km<sup>2</sup> (CHG, 1998) de los cuales 1319 km<sup>2</sup> se sitúan aguas arriba de su confluencia con el Brazo de la Torre, en el inicio de Entremuros, y el resto corresponde a la zona de marismas (Borja et al., 2001). La longitud del río es de 140 km, su nacimiento se encuentra en la provincia de Sevilla, cerca de El Castillo de las Guardas y desemboca en La puebla del Río. Presenta un desnivel de unos 480 metros, con una pendiente media de 3.9 por mil. El principal afluente del Río Agrio (Fuente Junta de Andalucía, departamento de Medio Ambiente). El principal embalse que se encuentra en esta cuenca es el del Agrio, en el municipio de Aznalcóllar, tiene una capacidad media de unos 20 hm<sup>3</sup>, y fue construido por APIRSA en la década de 1970 para abastecer a las necesidades de la explotación minera (Borja et al., 2001). Según estudios del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), en la estación foronómica catalogada con el número 5056 del río Guadiamar, en el anuario de aforos de 2016- 2017, los datos anuales varían entre mínimos de 0.03 m<sup>3</sup>/s a máximos de 14.66 m<sup>3</sup>/s, teniendo un caudal medio 0.744 m<sup>3</sup>/s.

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)



**Figura 9:** Mapa de la Cuenca del Río Guadamar.

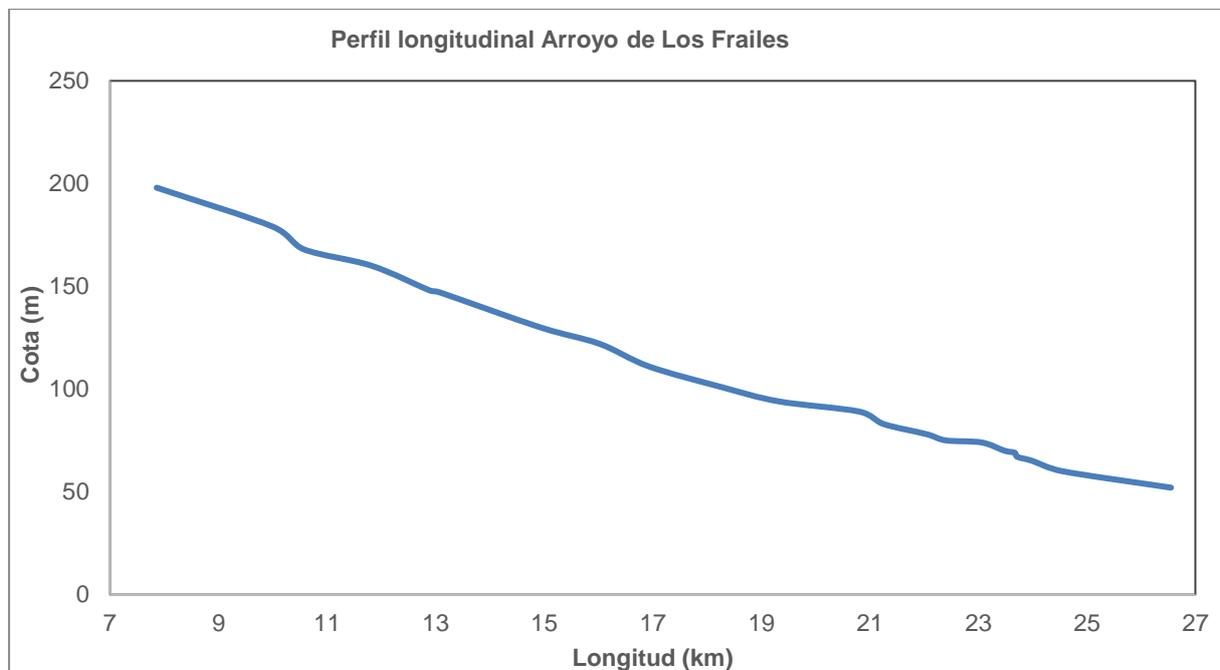
Este trabajo se centra en la subcuenca del arroyo de Los Frailes, con una superficie de 76 km<sup>2</sup>, tiene un eje principal bien definido en dirección Norte-Sur, con numerosos afluentes por ambas márgenes (IGME, 2003). Esta subcuenca no está regulada por ninguna obra hidráulica. Los principales afluentes de Los Frailes son los arroyos Tamujoso y Cubillo.

En este apartado también es importante destacar la hidrogeología de la zona, ya que existen tres acuíferos: Mioceno de base (Niebla-Posadas), Almonte-Marismas y aluvial de los ríos Agrío y Guadamar. El primer acuífero mencionado anteriormente, es el que afecta en la zona de estudio de este trabajo. Para la caracterización del mismo se ha usado el Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Sevilla (IGME-Diputación de Sevilla, 2003). El acuífero de Niebla-Posada se localiza a lo largo de una banda que se extiende en dirección OSO-ENE, en el contacto entre los dominios geográficos de Sierra Norte y la Depresión del Guadalquivir. Geológicamente la formación está compuesta por materiales de edades pertenecientes al Neógeno y Cuaternario, estos se encuentran desde Niebla (Huelva), hasta Posadas, en Córdoba y atravesando la provincia de Sevilla. El acuífero tiene una superficie de 287 km<sup>2</sup>, con una longitud de 150 km y una anchura media de 2 km, con altitudes comprendidas entre los 100 y los 300 m (IGME, 2010). Los materiales que componen al acuífero son

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)

detríticos, cuya potencia varía entre los 10 y 15 m en la zona de Niebla y con 80 o 100 m en la parte más oriental. Concretamente en la zona de estudio que se encuentra en el tramo de Niebla-Gerena los principales materiales que componen el acuífero son arenas (IGME, 2010).

En estudios previos se ha obtenido que los materiales paleozoicos tienen una baja permeabilidad, con valores de la conductividad hidráulica en torno a  $10^{-9}$  m/s (Custodio et al., 2001). Los valores anteriores pueden variar debido a una porosidad secundaria, producidas por estructuras geológicas como fallas, diaclasas o fracturas, aunque en ocasiones pueden estar rellenas de arcillas (Custodio et al., 2001). En la formación del Complejo Vulcano Sedimentario se han medido valores de conductividad de  $1,2 \cdot 10^{-6}$  y  $5,8 \cdot 10^{-7}$  m/s (Custodio et al., 2001). Respecto al Grupo PQ, se midieron valores de  $4 \cdot 10^{-6}$  y  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s (Custodio et al., 2001).



**Figura 10:** Perfil longitudinal del tramo estudiado del Arroyo de Los Frailes, donde se representa en el eje de abscisas la longitud (km) y en ordenadas la cota (m). Información obtenida del visualizador de datos cartográficos IBERPIX (CNIG y IGN).

En la figura 10 se muestra el perfil longitudinal del Arroyo de Los Frailes el cual se ha tomado como punto inicial en el comienzo del arroyo Tamujoso y termina con la confluencia con el río Agrio, a los 26 km de longitud. Se puede observar como el arroyo comienza con la cota máxima en 198 m y mínima en 59.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Datos utilizados

Los datos que se han usado en este trabajo son de distintas procedencias, desde organismos públicos (Red de Información Ambiental de la Junta de Andalucía - REDIAM- y el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía) y facilitados por Minera Los Frailes S.L.

#### - PRECIPITACIONES

Los datos de precipitaciones con los que se han trabajado proceden del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), de la Cuenca del Guadalquivir y de una estación pluviométrica de Minera Los Frailes S.L. dentro del recinto de la zona minera, la localización geográfica de las estaciones se puede observar en la figura 11. De la red SAIH se ha utilizado la estación más cercana a la zona minera, la E-67 del Embalse del Agrio, así como otras del entorno (tabla 2). Los datos de precipitación de Minera Los Frailes se dan para intervalos de 10 minutos mientras que los de la estación de la RED SAIH (tabla 2) son para intervalos horarios.



**Figura 11:** Localización geográfica de las estaciones del SAIH, donde se observan las cabeceras municipales y la zona roja el recinto minero de Aznalcóllar. (Fuente: Rediam).

### - NIVELES Y CAUDALES DEL ARROYO DE LOS FRAILES

Los datos de nivel del arroyo de Los Frailes han sido aportados por la empresa Minera Los Frailes. Los datos medidos en el campo se han obtenidos mediante data loggers programados para calcular la altura del agua cada diez minutos en ALF-A y ALF-B (Fig.- 12), en el punto ALF-A se han tratado datos con un periodo de tiempo del 14 de abril de 2020 al 26 de junio del 2020, mientras en ALF-B del 12 de marzo del 2020 al 11 de junio del 2020. También se ha contado con puntos de referencia (jalones) en los puntos EAF-01, EAF-02 y EAF-03.



**Figura 12:** Ubicación de los puntos de muestreo de Minera Los Frailes con datos de niveles y caudales de agua. Se observa el borde este de la corta de Los Frailes (Fuente: Google Earth).

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)



**Figura 13:** Ejemplo de medición de secciones con molinete en los puntos EAF-01 y EAF-03 elaborados con Autocad (Fuente: Minera Los Frailes).

A partir de los datos puntuales de niveles y caudales, se obtuvieron las curvas de gastos, las cuales se tratan en el punto 4.2. de este trabajo.

### - CAPAS DE INFORMACIÓN USADAS

Las bases de datos usadas en este trabajo han sido extraídas de la plataforma de la Junta de Andalucía (REDIAM y el Instituto Estadístico y Cartográfico de Andalucía). Se han usado capas de información sobre relieves y usos del territorio, para la creación de mapas, además de extracción y análisis de datos para este trabajo. También han sido útiles capas de información (como curvas de nivel) obtenidas a partir del MDT. La información usada sobre hidrología ha sido extraída de capas con datos de aportaciones de las subcuencas del Guadalquivir, también de la capa de la red hidrográfica de Andalucía e información sobre masas de aguas superficiales, como embalses, o subterráneas, como acuíferos. La información geológica se ha obtenido de capas polinómicas, con información sobre la edad y la litología de los materiales

de la zona de estudio. Por último, se ha usado información de Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA) sobre relieve, hidrografía y usos de suelos, para complementar los datos de REDIAM.

### **3.2. Tratamiento de los datos**

Los mapas usados para este trabajo se han realizado mediante el tratamiento de capas de información, con programas como ArcGIS. Se han usado capas con los datos de delimitaciones de los territorios de España y Andalucía, para remarcar la provincia de Sevilla. Se han incluido las capas puntuales de los municipios que aparecen en las figuras, como Aznalcóllar, Gerena, etc. A partir de las capas de información de la red hidrográfica de la cuenca del Guadalquivir se han extraído las subcuencas de Frailes y Guadiamar. La capa de subcuenta del arroyo Los Frailes se ha usado para delimitar toda la información necesaria como geología, usos de suelo, etc. Por último, se ha usado un MDT para el estudio de las altitudes en la zona.

Los datos de precipitaciones extraídos del SAIH se han tratado mediante una representación gráfica, con hojas de cálculo en Excel, se ha correlacionado la precipitación en cada estación con su altitud sobre el nivel del mar. Antes de comenzar con el tratamiento de datos se ha efectuado un paso previo, el cual ha consistido en rellenar con el valor ``0`` las medidas donde no existían datos. Para ello se han revisado las medidas de estaciones meteorológicas cercanas, y así poder corroborar que esos días no se produjeron precipitaciones.

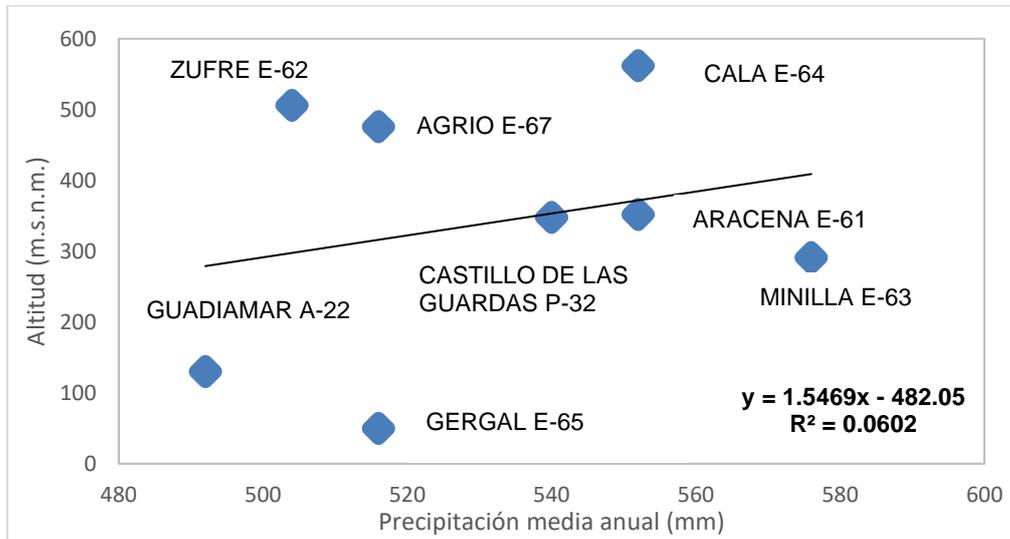
## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. Precipitaciones**

#### **- PRECIPITACIÓN MEDIA EN LA ZONA**

En la Tabla 2 se exponen los datos de las precipitaciones del año hidrológico 2019/20 en las estaciones utilizadas de la red S.A.I.H. No se observa una relación clara entre la altitud de las estaciones y el aumento de precipitación. Las precipitaciones variaron entre 492 mm (estación Guadiamar A-22) y 576 mm (Minilla E-63). En la estación Agrio E-67, la más próxima a la zona de estudio, la precipitación fue de 516 mm. En la Fig.- 14 se muestra la para relación e inexistente entre las estaciones meteorológicas.

### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)



**Figura 14:** Representación de los datos de precipitación en el año hidrológico 2019/20 frente a la altitud de las estaciones de la red SAIH en el entorno de la zona de estudio.

**Tabla 2:** Tabla resumen de la altitud y la precipitación de 2019/2020 de las estaciones meteorológicas de la red SAIH (2019/2020).

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ALTITUD (m.s.n.m.)	Precipitación (mm)
GUADAMAR A-22	130	492
ARACENA E-61	352	552
ZUFRE E-62	506	504
MINILLA E-63	291	576
CALA E-64	562	552
GERGAL E-65	50	516
AGRIO E-67	476	516
CASTILLO DE LAS GUARDAS P-32	348	540

En el mapa de las precipitaciones en Andalucía durante 2019 (Fig.- 15) muestra las estaciones con mayores lluvias son la E61 (Aracena) y E64 (Cala), en el rango de 702 a 885 mm, mientras las demás estaciones se encuentran en el rango de 519 a 702 mm. Comparando los datos de la precipitación media anual de España que es de 667 mm, con los datos de año 2019/2020 de las estaciones usadas en este trabajo se puede decir que ha sido un año medio sin llegar a ser húmedo.

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

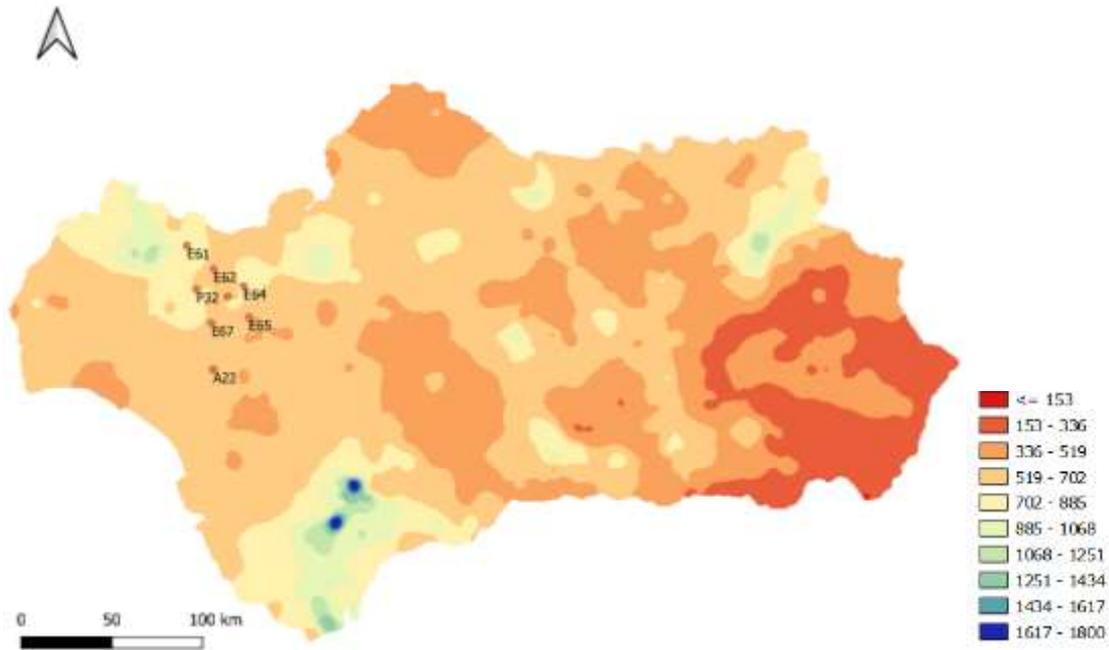


Figura 15: Representación de las precipitaciones de 2019 en Andalucía (Fuente: Rediam)

### - EVOLUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN 2019/2020

La evolución mensual de las precipitaciones desde octubre de 2019 hasta septiembre de 2020 se puede observar (Fig.- 15) cómo las mayores precipitaciones ocurrieron en los meses de invierno (de noviembre a enero) y en la primavera (marzo, abril y mayo), siendo muy escasas durante el resto de los meses.

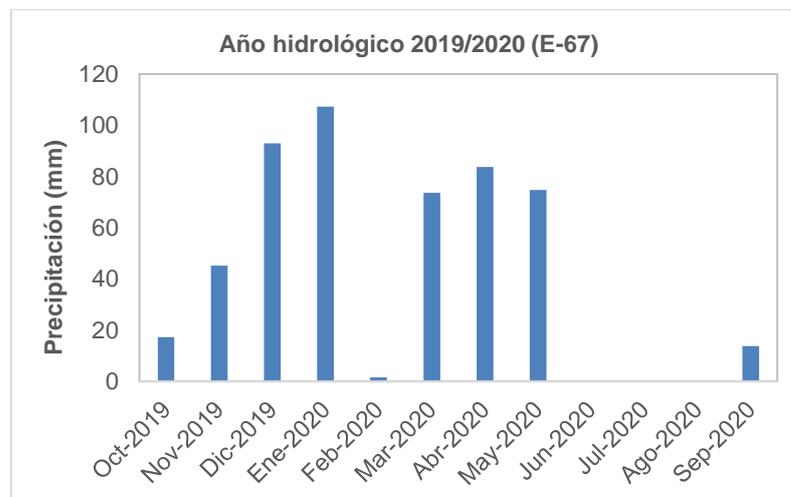
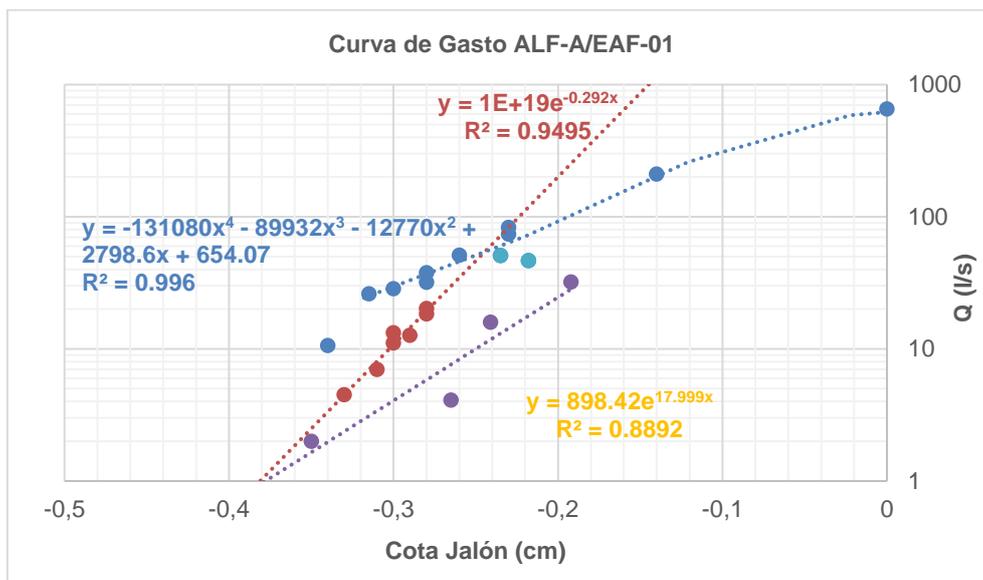


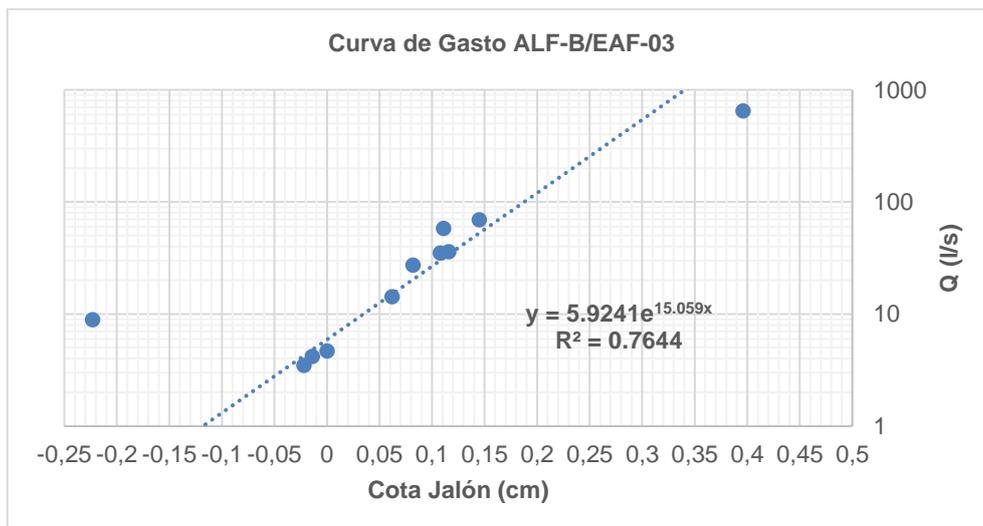
Figura 16: Gráfico de barras donde se representan los datos de precipitaciones en el año 2019/20, en la estación E-67 (Agrido) (Fuente: SAIH).

## 4.2. Curvas de gasto

En las figuras 16 y 17 se muestran las curvas de gastos proporcionados por Minera Los Frailes. En estas gráficas se representan las medidas de caudales en los puntos ALF-A y ALF-B frente al nivel del agua sobre jalones de referencia en los puntos EAF-1 y EAF-3.



**Figura 17:** Curvas de gastos del punto ALF-A/EAF-01 facilitadas por Minera Los Frailes. En el eje de abscisas está representada la altura de la lámina de agua medida en el jalón frente al caudal (Q) en escala logarítmica.



**Figura 18:** Curva de gastos del punto ALF-B/EAF-03 facilitada por Minera Los Frailes. En el eje de abscisas está representada la altura de la lámina de agua medida en el jalón frente al caudal (Q) en escala logarítmica.

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)

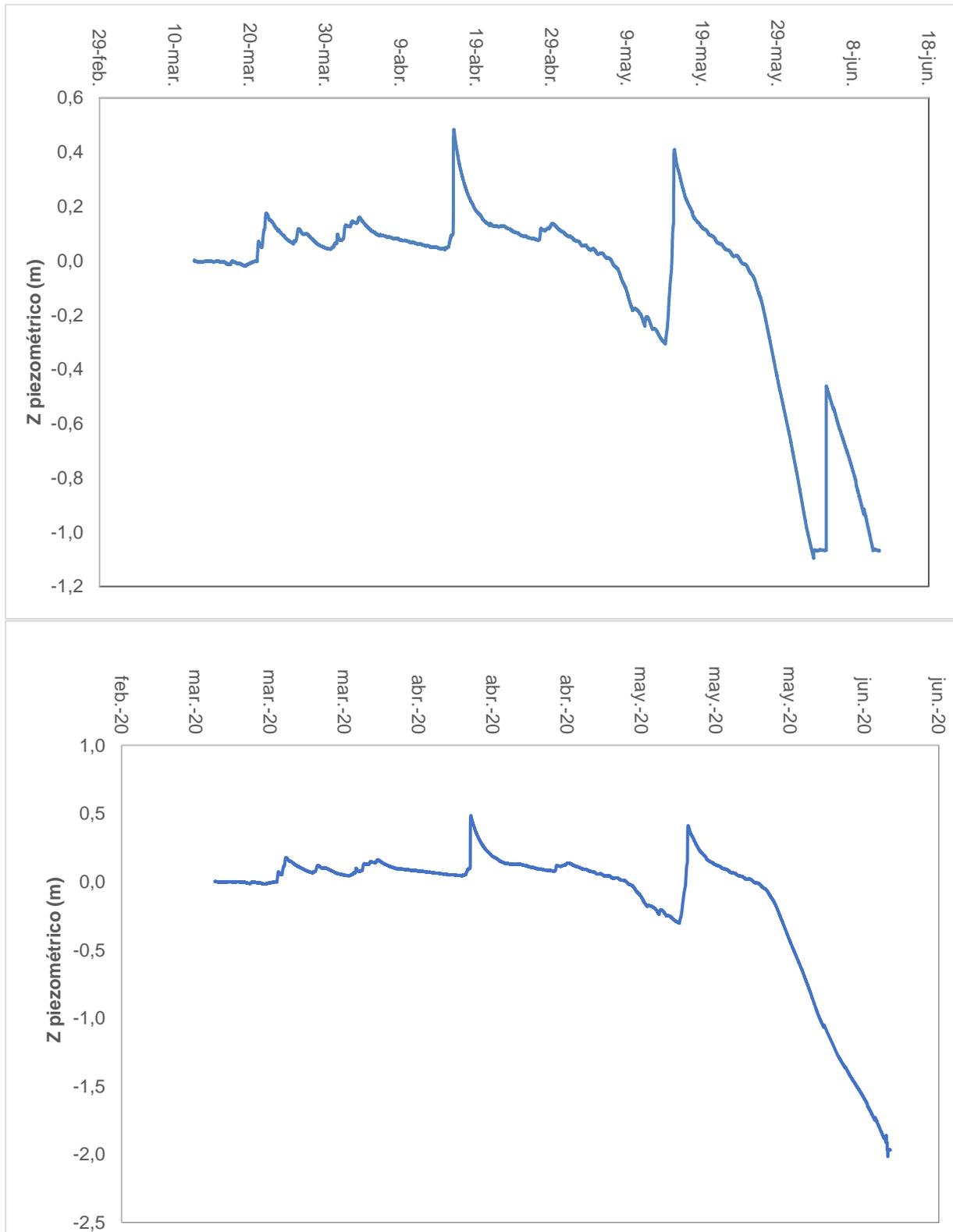
Para el punto ALF-A frente EAF-01 se tienen tres rectas (Fig.-17). En ALF-A se aplican tres ecuaciones distintas ya que se diferencian tres periodos. La primera parte comprende del 15 de marzo al 6 de mayo de 2019 (datos representados con el color rojo), el segundo periodo corresponde desde el 30 de enero de 2020 al 10 de mayo de 2020 (datos representados en color azul) y una tercera parte corresponde del 11 de mayo al 4 de junio de 2020 (línea de la ecuación representada con un color morado (Fig.-17). Cabe destacar que la primera ecuación de los datos representada no se ha usado puesto que los datos utilizados en este trabajo van desde el 20 de enero de 2020 hasta el 4 de junio de 2020.

En el ALF-B frente a EAF-03 sólo existe una ecuación para la curva de gastos (Fig.-18):  $y = 5.9241e^{15.059x}$ . En el gráfico se observan dos puntos más alejados de la línea de tendencia que podrían ser debidos a errores a la hora de tomar los datos. El periodo de los datos de la curva de ALF-B comprende desde el 12 de marzo al 28 de mayo de 2020.

En ALF-B se corrigieron los datos de niveles obtenidos cada diez minutos a partir del 2 de junio de 2020 (Fig.- 19). Esto es debido a que parece que el data-logger se quedó fuera del agua al disminuir el nivel a partir de esta fecha. Los datos de la meseta observada en la figura 19 (parte superior) se han corregido continuando la tendencia al descenso previo. El día 2 de junio de 2020 se debió instalar el data logger a una mayor profundidad, lo que genera una elevación ficticia del nivel. A partir de esta fecha, se han restado a los datos un valor de 0,000813 cm, para conseguir una continuidad en los niveles (Fig.-19 inferior).

Las curvas de gastos anteriores se han aplicado a los datos de niveles medidos cada diez minutos obtenidos en los puntos ALF-A y ALF-B, respectivamente, para ver cómo evoluciona el caudal en cada punto.

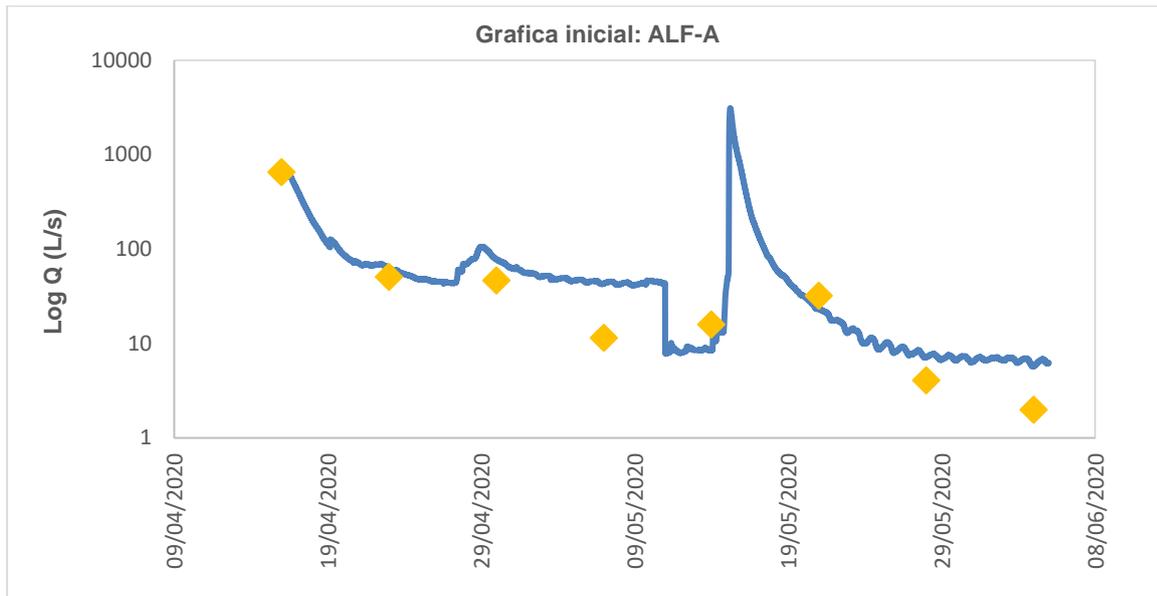
### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)



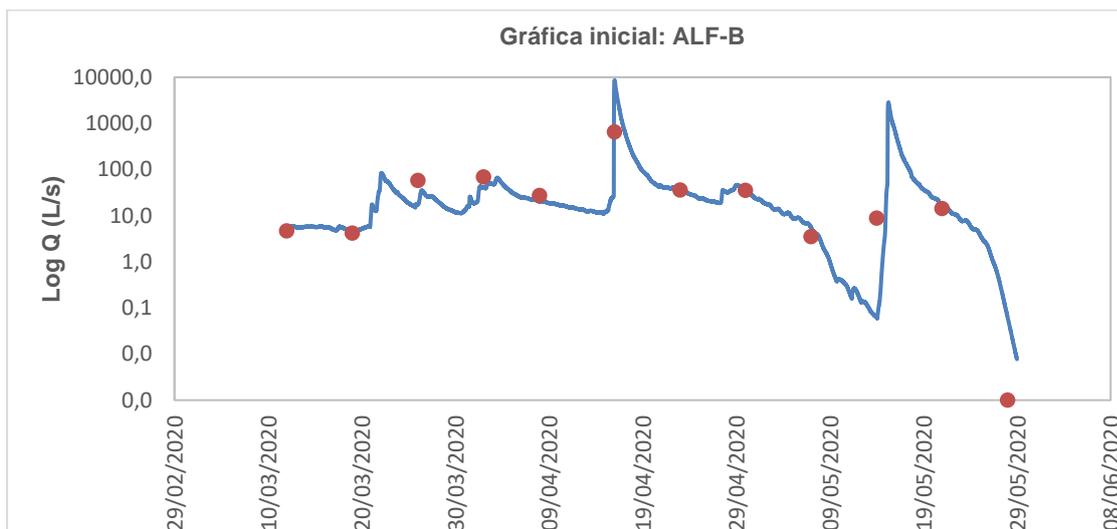
**Figura 19:** Figura de los datos de niveles originales en el punto ALF-B (arriba) y con las correcciones realizadas a partir del 2 de junio de 2020 (abajo).

### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

En el punto ALF-A se observan diferencias importantes entre los valores aforados y calculados a partir de las curvas de gastos, así como un 'salto' artificial el 10 de mayo de 2020, coincidiendo con el cambio entre dos curvas de gastos (Fig.- 19). La representación de estos datos dio un buen ajuste en el punto ALF-B (Fig.- 20).



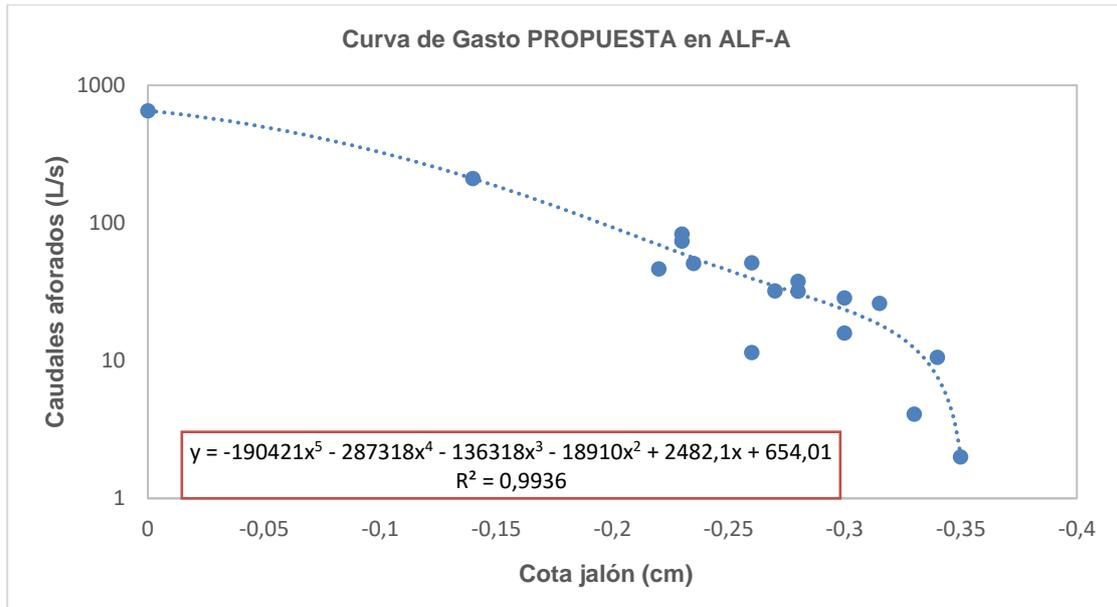
**Figura 20:** Evolución de los caudales calculados en ALF-A con las curvas de gastos originales. Los rombos indican los datos aforados.



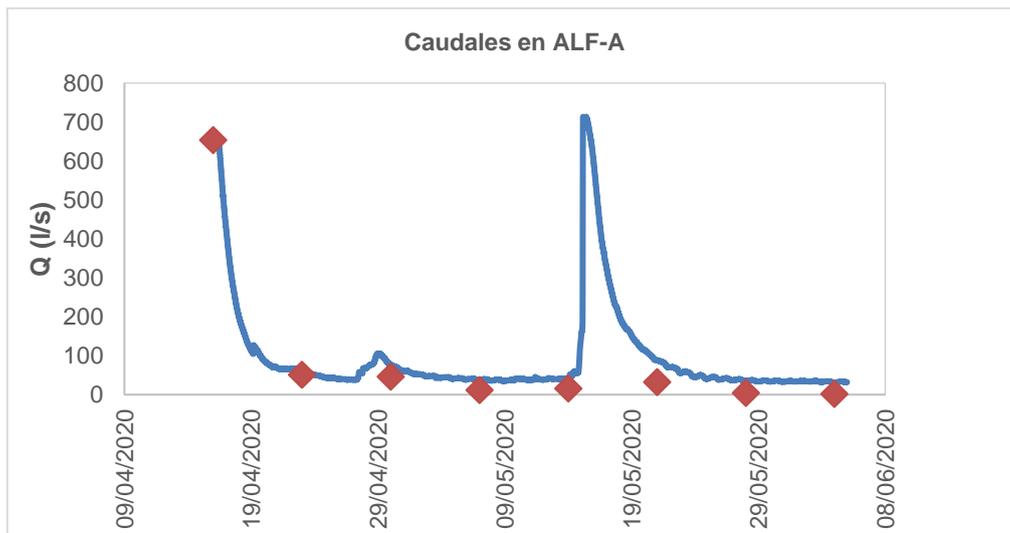
**Figura 21:** Evolución de los caudales calculados en ALF-B con las curvas de gastos originales. Los círculos indican los datos aforados.

### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

Ante el problema de las diferencias entre los caudales calculados y aforados en el punto ALF-A se propone una nueva curva de gasto mediante un ajuste polinomial, con solo una ecuación para todo el periodo de datos (Fig. 22). Con ello se consigue evitar el salto que se produce en la fecha donde hay un cambio en la curva de gastos utilizadas (Fig.- 23).



**Figura 22:** Curva de gasto propuesta para el punto ALF-A



**Figura 23:** Representación de los caudales en ALF-A frente al tiempo con la curva de gastos propuesta. Los rombos representan los caudales aforados.

### 4.3. Correlaci6n entre precipitaci6n y caudales

Para este apartado se han usado los datos de precipitaci6n aportados por Minera Los Frailes S.L., desde el 1 de enero hasta el 16 de junio de 2020. Existían algunos periodos sin datos que se han completado con la informaci6n del S.A.I.H. concretamente de la estaci6n E-67 (estaci6n del Agrio), elegida por su proximidad a la zona de estudio.

#### 4.3.1. Punto ALF-A

En el punto ALF-A se observa un desfase entre el primer pico de la precipitaci6n y el caudal de unas 40 horas, en el segundo pico a partir de mayo el retardo de la precipitaci6n es de 48 horas, y se observa c6mo con precipitaciones menores se han medido caudales mayores. Se observan tres crecidas mayores una a mediados de abril, otra a finales de abril y la tercera a mediados de mayo de 2020 por unas precipitaciones previas de 12 mm en la primera crecida, de 8.6 mm en la segunda y 9.4 mm en la tercera crecida. La crecida inicial no est1 bien definida al inicio de la serie, por lo tanto, no se estudiar1 en este trabajo. Existe un desfase entre las precipitaciones y los aumentos de los caudales.

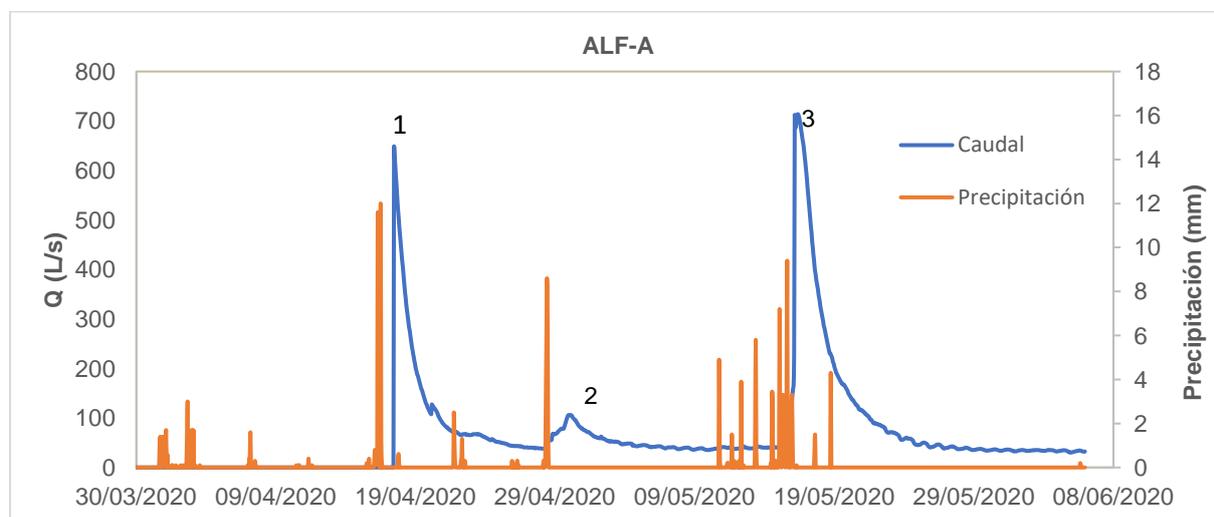
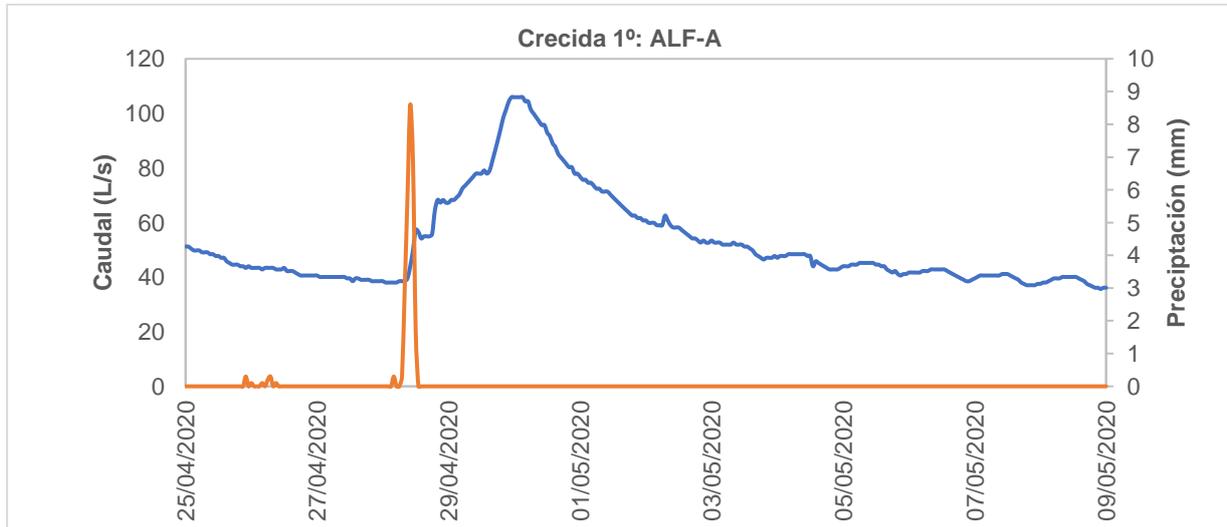


Figura 24: Representaci6n del caudal obtenido del data-logger y la precipitaci6n en el punto ALF-A.

En la figura 24 se observan tres crecidas importantes, la primera se produjo el 18 de abril, la segunda el 29 de mayo y la tercera el 14 de mayo, la influencia de las precipitaciones causan un aumento de caudal. Se han analizado la segunda y la tercera crecida por la falta de datos de la primera crecida. Analizando cada crecida en detalle se comprueba que la primera crecida (Fig.-25) fue generada por unas precipitaciones de 8.5 mm el 28 de abril de 2020 a las 10:00. Los datos medidos en la figura 25 muestran que los puntos de m1ximo caudal son 104 L/s el 29 de abril de

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

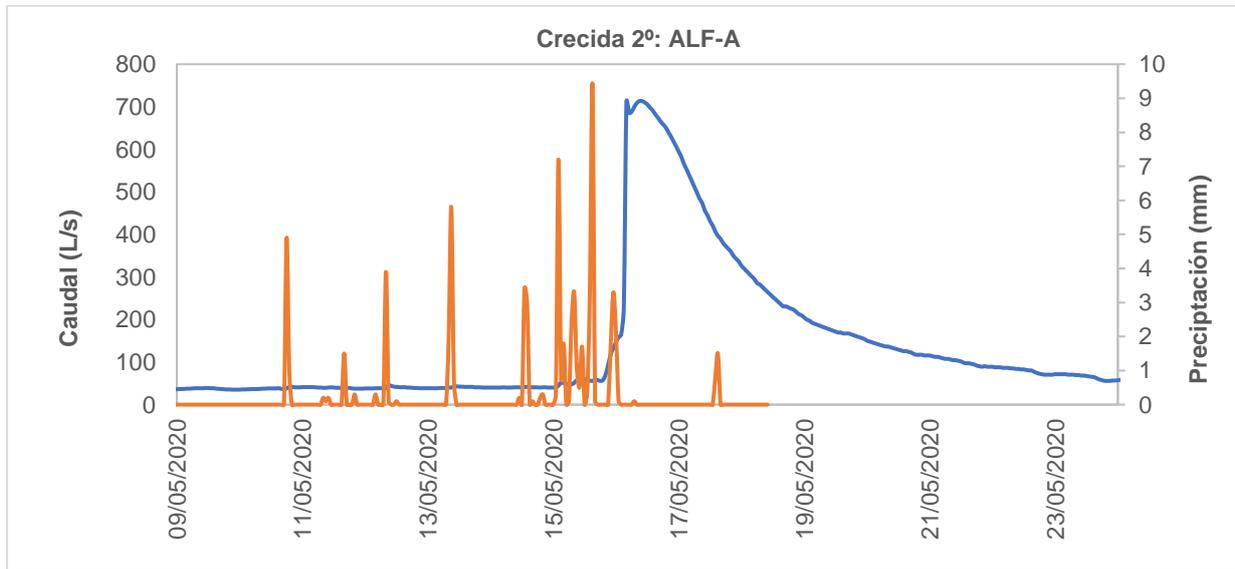
2020 a las 02:00. La respuesta del caudal ante las precipitaciones se produce con un desfase de 4 horas.



**Figura 25:** Detalle de la primera crecida en ALF-A ocurrida por unas precipitaciones de 8.5 mm el 28 de abril. En azul se muestra el caudal y en naranja la precipitación.

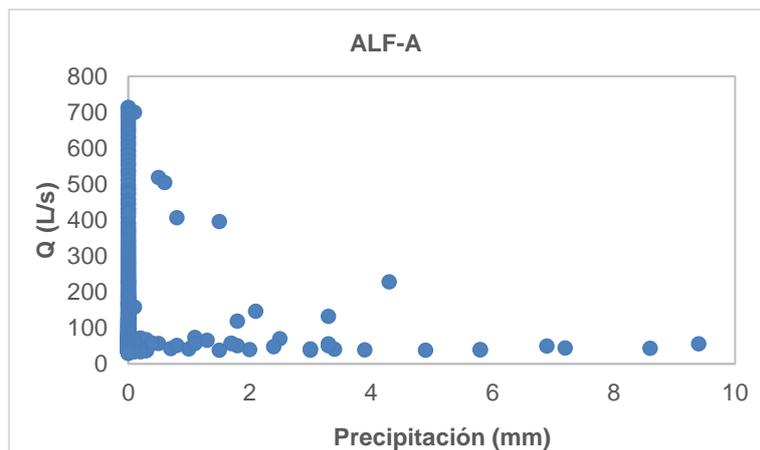
La segunda crecida ocurrida en mayo es mucho mayor que la primera (Fig.-26), como consecuencia de precipitaciones más intensas que comenzaron por el 14 de mayo de 2020 a las 13:00 (3.4 mm) y continuaron el día 15 de mayo, con precipitaciones de 7.2 mm a las 2:00, 9.4 mm a las 15:00, 3.3 mm a las 23:00 y otras lluvias menos intensas. En total las precipitaciones del día 15 de mayo ascendieron a 9.4 mm. El 15 de mayo de 2020 se obtienen dos máximos uno a las 15:00 con 9.4 mm y el segundo a las 23:00 con 3.3 mm. En la evolución de los caudales se observan dos máximos, el primero el 15 de mayo a las 15:00 con 712 L/s, y el segundo el 16 de mayo a las 10:00 con 713 L/s. Observando los datos obtenidos en la 2<sup>o</sup> crecida, muestra que se obtiene un mayor caudal con una precipitación mayor.

### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)



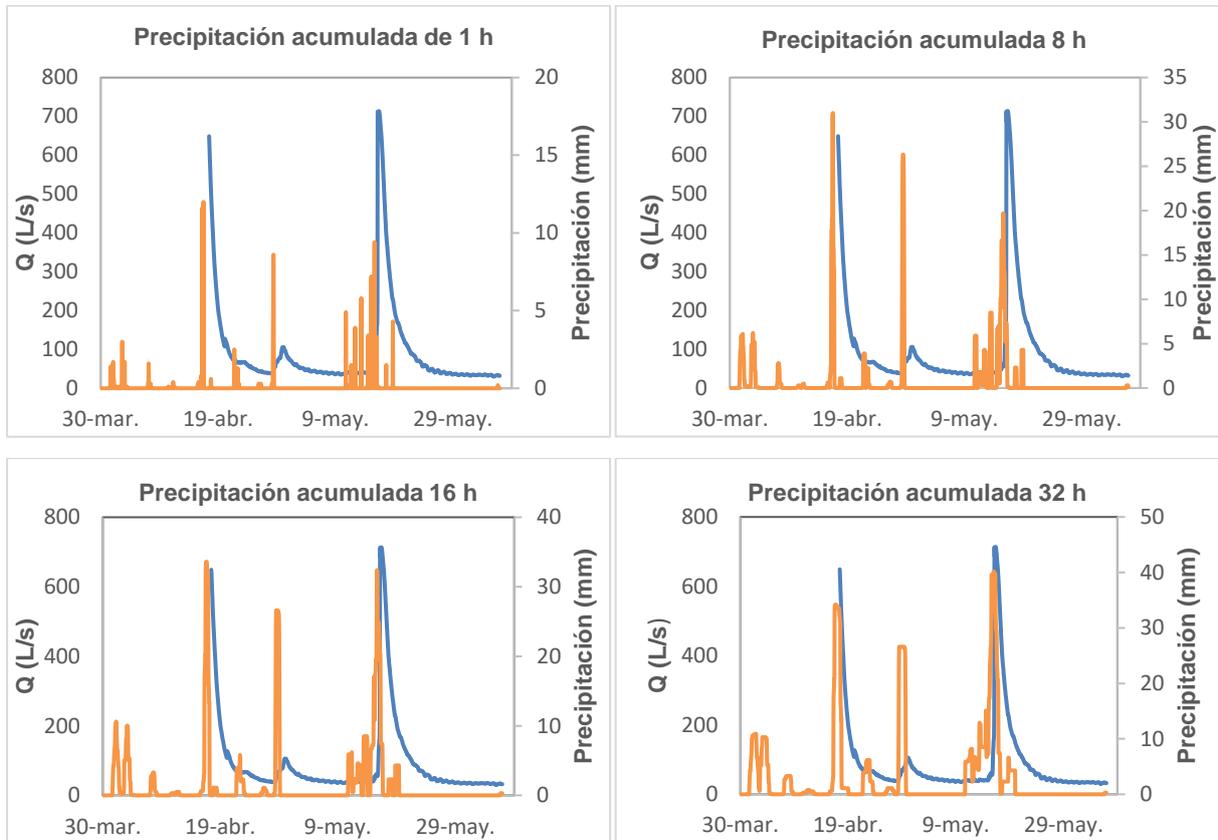
**Figura 26:** Detalle de la segunda crecida en ALF-A ocurrida a mediados de mayo. En azul se muestra el caudal y en naranja la precipitación.

En la representación gráfica de las precipitaciones frente a los caudales se observa que no hay una buena correlación (Fig.- 27). Se intentó el desplazamiento de las series de datos para ver si se conseguían mejores relaciones, pero tampoco dio buenos resultados. Por todo ello se probó a correlacionar los caudales con las precipitaciones previas acumuladas con distintos periodos de tiempo (Figs.- 28 y 29).



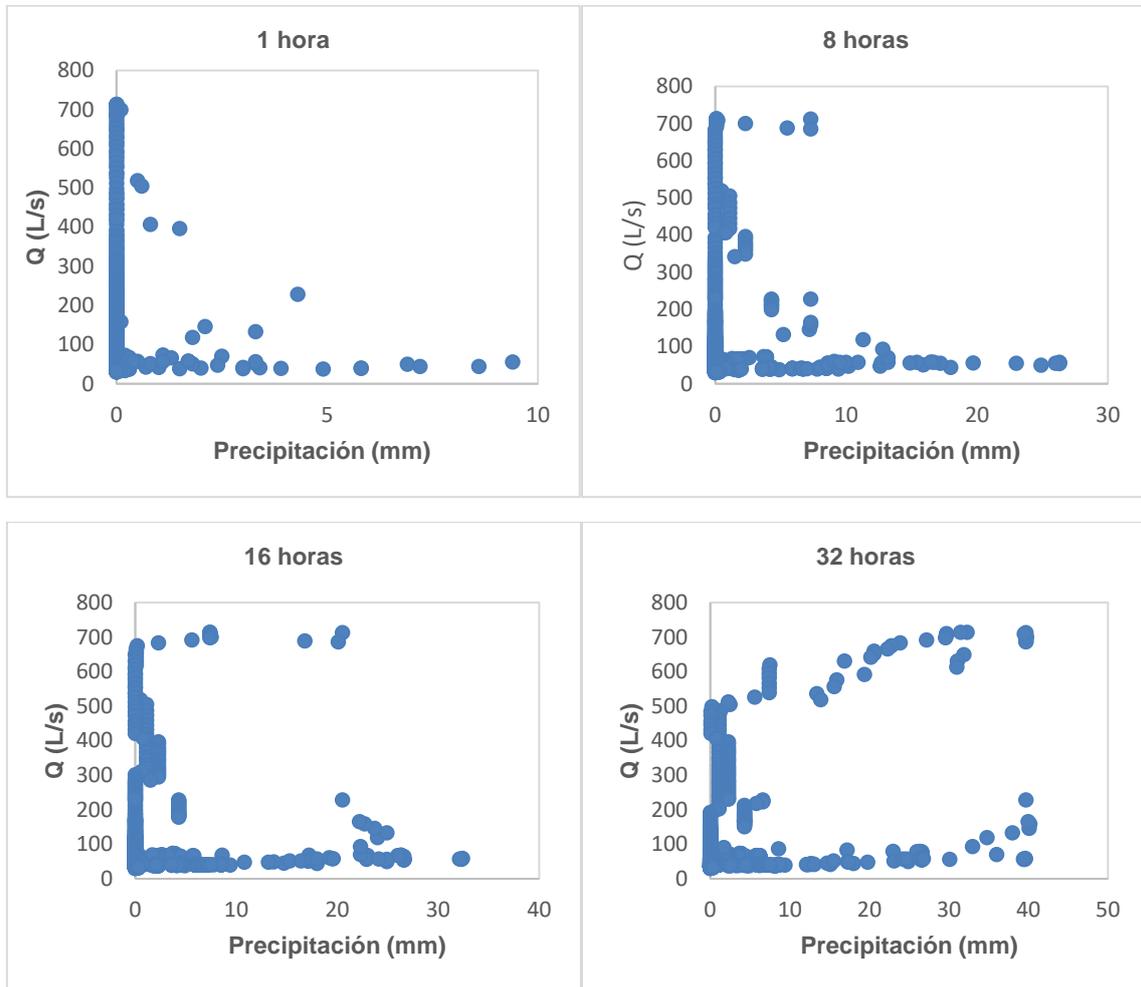
**Figura 27:** Representación de la precipitación frente a los caudales en ALF-A (datos horarios).

### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)



**Figuras 28:** Representación de la evolución del caudal (azul) y precipitaciones (rojo) en el punto ALF-A. La primera gráfica indica la evolución del caudal y la precipitación previa en 1 hora, la segunda el caudal y la precipitación previa acumulada en 8 horas, la tercera la precipitación acumulada en 16 horas y la cuarta la precipitación acumulada en 32 horas.

### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)



**Figura 29:** Representación de los datos de caudal y la precipitación previa acumulada en 1, 8, 16 y 32 horas en ALF-A .

En la figura 28 se muestra las relaciones entre precipitación acumulada (1, 8, 16 y 32 horas) frente a los caudales tampoco proporcionan buenas relaciones. Ello se debe a que la serie de las precipitaciones acumuladas tienen una forma de ascensos y descensos muy bruscos, muy diferentes a las series de caudales (Fig.- 29). Para intentar mejorar las correlaciones se realizó una ‘modulación’ de las precipitaciones multiplicando los valores de precipitaciones cada hora por unos coeficientes. Para un dato de caudal concreto, se multiplica la precipitación en ese mismo instante por un coeficiente, la precipitación de la hora previa por otro y así sucesivamente. Los coeficientes van descendiendo a medida que el desfase entre el dato de caudal y la precipitación es mayor, ya que es lógico que, por ejemplo, la precipitación previa en 1 hora tenga más influencia en el caudal de un momento dato que las precipitaciones de 48 horas antes. Finalmente, las precipitaciones moduladas de este modo se acumularon en distintos periodos de tiempo. Se realizaron varios intentos para encontrar una mejor correlación con los datos obtenidos. Los coeficientes utilizados se muestran en la tabla 3.

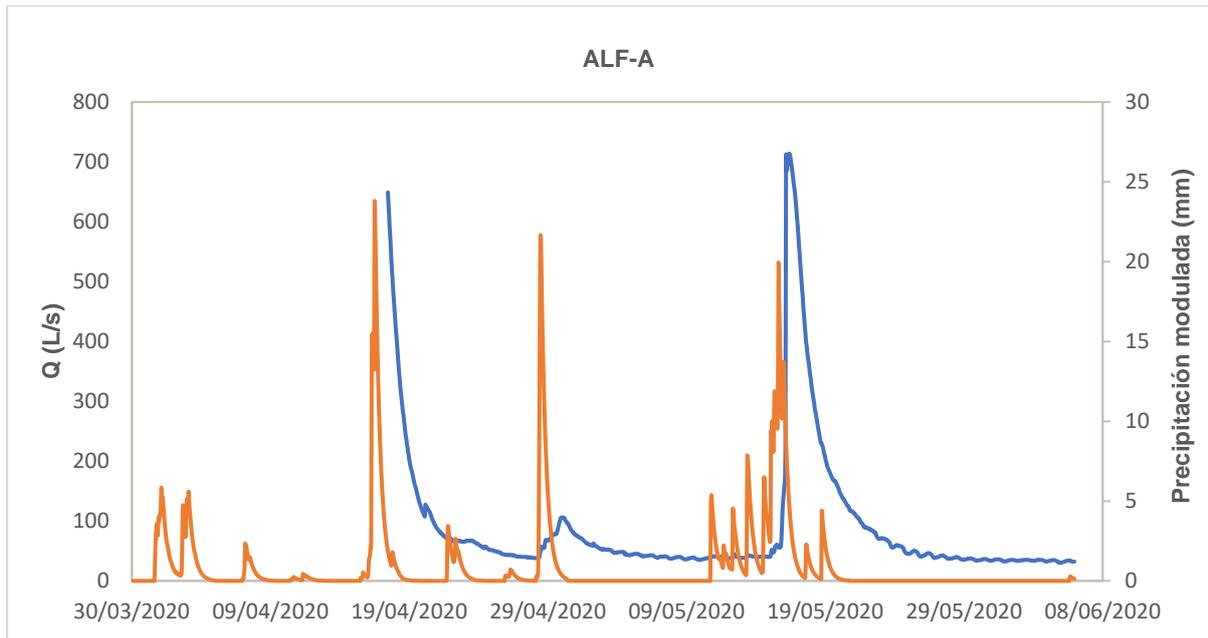
### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)

**Tabla 3:** Coeficientes usados para la obtención de la precipitación modulada (las horas se refieren a las horas previas a una precipitación determinada).

HORAS	COEFICIENTES	HORAS	COEFICIENTES
48	0,005	24	0,074
47	0,005	23	0,083
46	0,006	22	0,093
45	0,007	21	0,104
44	0,008	20	0,116
43	0,009	19	0,130
42	0,010	18	0,146
41	0,011	17	0,163
40	0,012	16	0,183
39	0,013	15	0,205
38	0,015	14	0,229
37	0,017	13	0,257
36	0,019	12	0,287
35	0,021	11	0,322
34	0,024	10	0,361
33	0,027	9	0,404
32	0,030	8	0,452
31	0,033	7	0,507
30	0,037	6	0,567
29	0,042	5	0,636
28	0,047	4	0,712
27	0,053	3	0,797
26	0,059	2	0,893
25	0,066	1	1,000

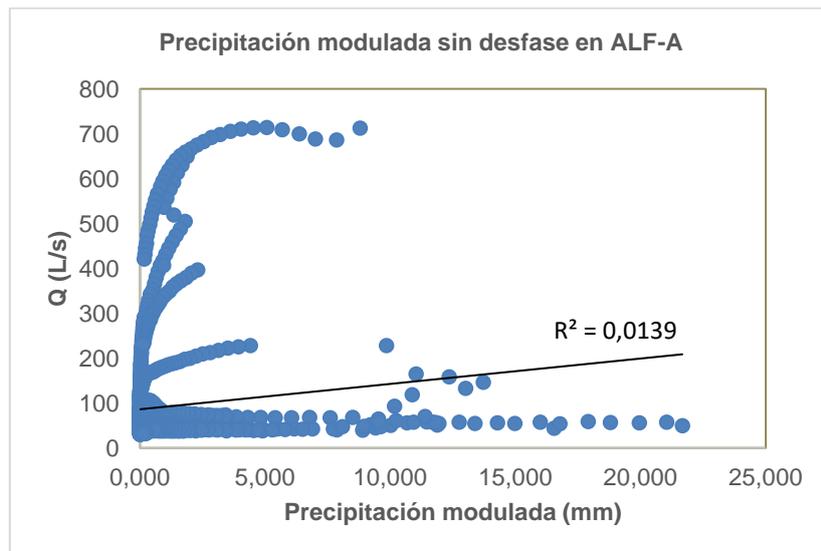
En la figura 30 se muestra como se ha conseguido que la serie de las precipitaciones moduladas acumuladas tenga una forma parecida al caudal durante la crecida.

### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)



**Figura 30:** Representación gráfica entre la precipitación modulada acumulada (línea naranja) y los datos de caudales (línea azul) en el punto ALF-A.

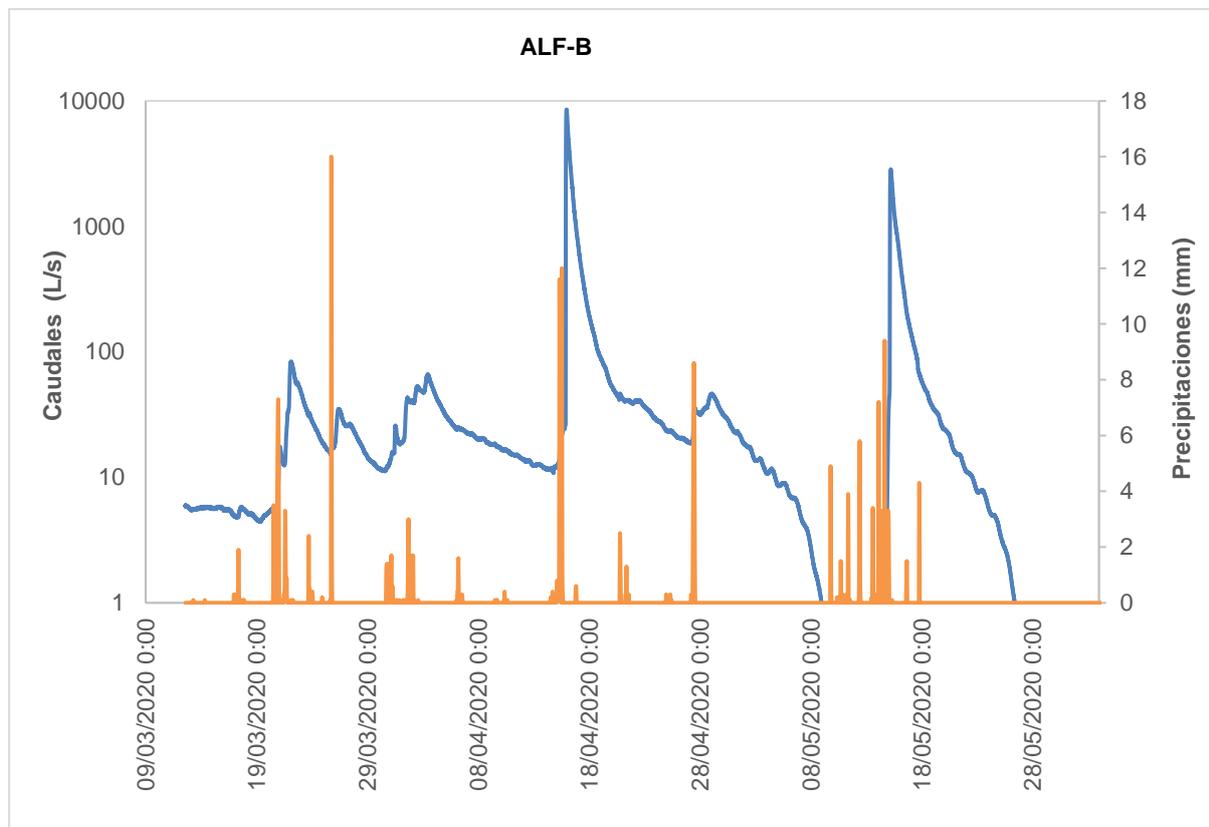
En la figura 31 se puede observar la relación entre las precipitaciones moduladas frente a los datos de caudal, se consigue mejorar la correlación, pero aun así no existe una buena relación entre los datos.



**Figura 31:** Representación de los datos de precipitación modulada frente a los datos de caudal, en ALF-A.

### 4.3.2. Punto ALF-B

En el punto **ALF-B** se han representado los datos horarios de precipitación y caudal, donde se observa dos crecidas significativas (Fig.- 32). La primera se produce el 16 de abril de 2020 con precipitaciones previas entre los días 13 y 15 de abril, mientras la segunda crecida se produce el 15 de mayo con lluvias entre el 12 y el 15 de mayo.



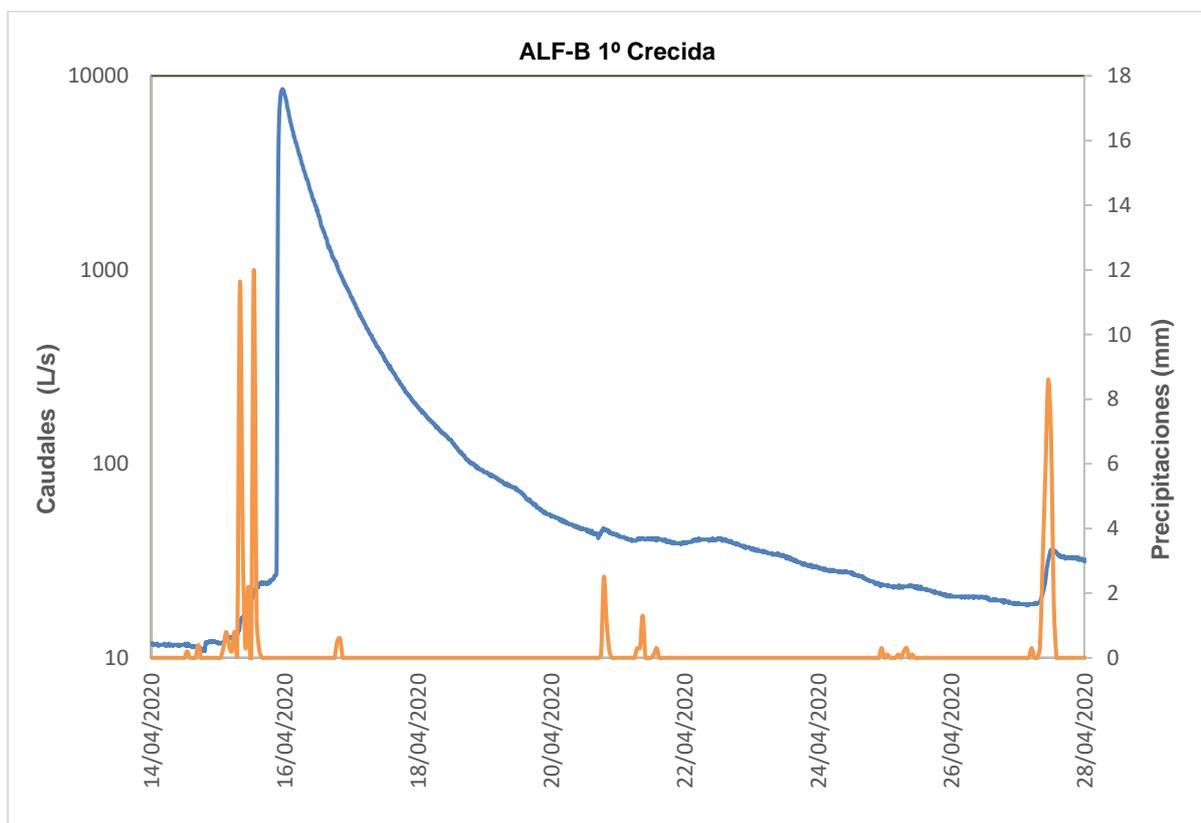
**Figura 32:** Representación gráfica de datos acumulados de una hora de caudal y precipitaciones en el punto EAF-B.

Los caudales en ALF-A y ALF-B deberían ser parecidos, pero se observa que entre el 8 y el 15 de mayo los caudales en ALF-B son muy bajos (menores de 1 L/s; Fig. 32) mientras que en ALF-A (Fig. 24) son superiores, lo que probablemente sea debido a la imprecisión de las curvas de gastos. En realidad, hay pérdida en ese tramo del arroyo (de entre 5- 8 l/s).

Los datos representados en la figura 32 muestran que el punto máximo de caudal en EAF-B fue de 8287 L/s el 16 de abril de 2020 a las 22:50. La respuesta de caudal ante las precipitaciones se produce con un desfase de 9 horas y 50 minutos. Las lluvias comenzaron el 15 de abril a las 08:00 (11.6 mm) y continuaron el día 15 de abril, con

### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

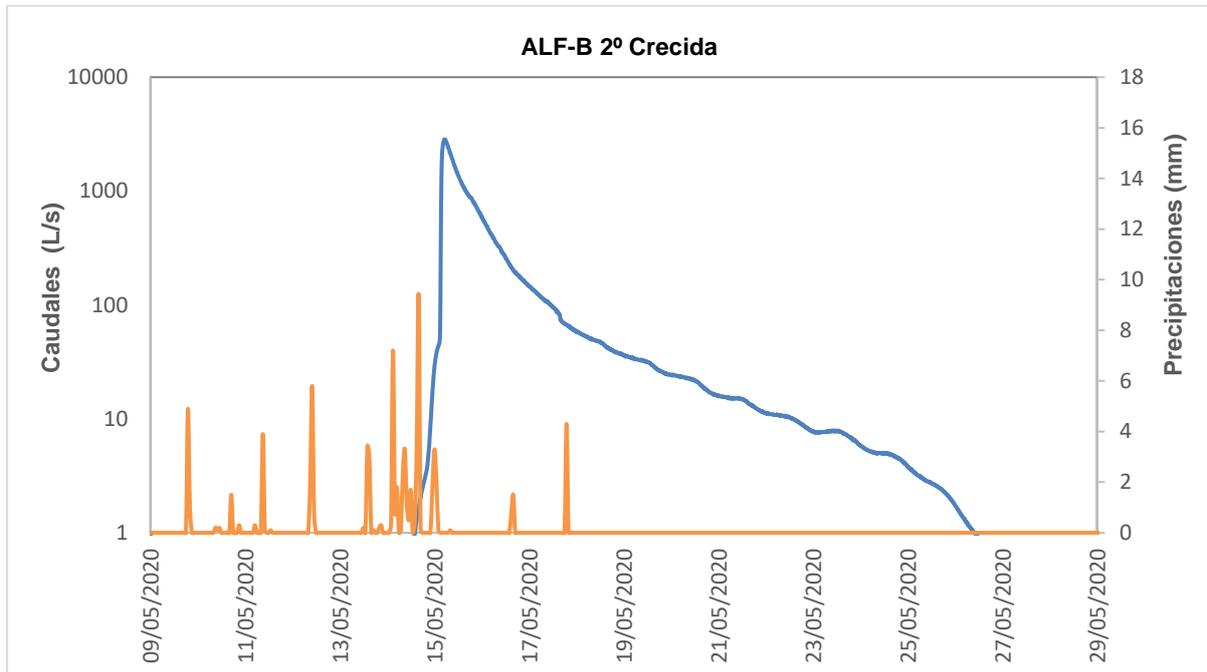
precipitaciones de 12 mm a las 13:00 y otras lluvias menos intensas. En total las precipitaciones del día 15 de abril ascendieron a 23.6 mm.



**Figura 33:** Detalle de la crecida del 16 de abril de 2020 en el punto ALF-B. En color naranja los datos de precipitación (mm) y en azul los datos de caudales (L/s), en ALF-B.

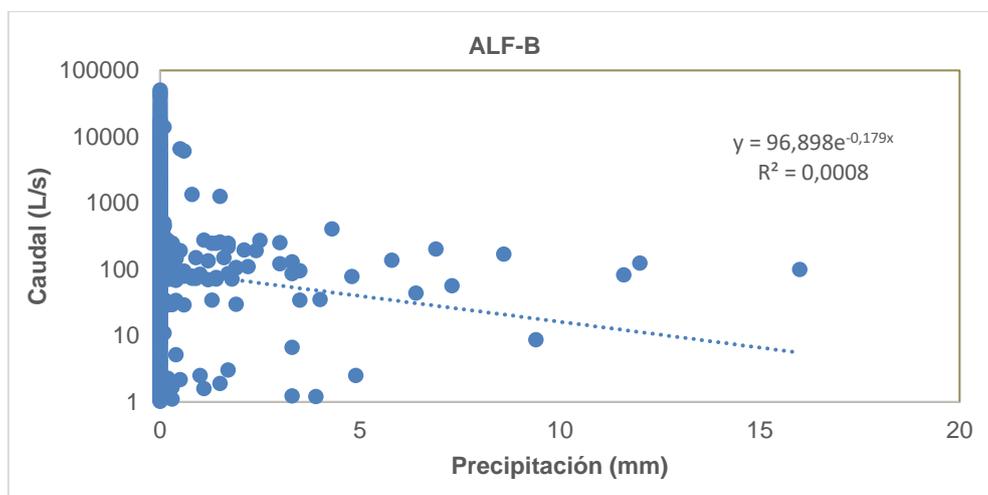
Respecto a la segunda crecida, las lluvias comenzaron el 14 de mayo a las 03:00 (7.2 mm) y continuaron el día 14 de mayo, con precipitaciones de 3.3 mm a las 09:00, 9.4 mm a las 16:00 y otras lluvias menos intensas. En total las precipitaciones del día 15 de mayo ascendieron a 19.9 mm. Esta crecida es mucho menor que la primera, el pico de caudal es de 2638 L/s el 15 de mayo de 2020 a las 6:20 (Fig.- 33). Es importante destacar que en la segunda crecida las precipitaciones son mayores que en la primera, sin embargo, el caudal es menor. Como consecuencia de precipitaciones mayores el caudal debería de ser mayor que en la primera crecida, esto probablemente se debe a que en mayo las temperaturas son más elevadas y, esto produce, que la evapotranspiración sea mayor, por lo que los suelos deben estar más áridos y se genera menos escorrentía.

### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)



**Figura 34:** Detalle de la crecida del 15 de mayo de 2020 en el punto ALF-B. En color naranja los datos de precipitación (mm) y en azul los datos de caudales (L/s), en ALF-B.

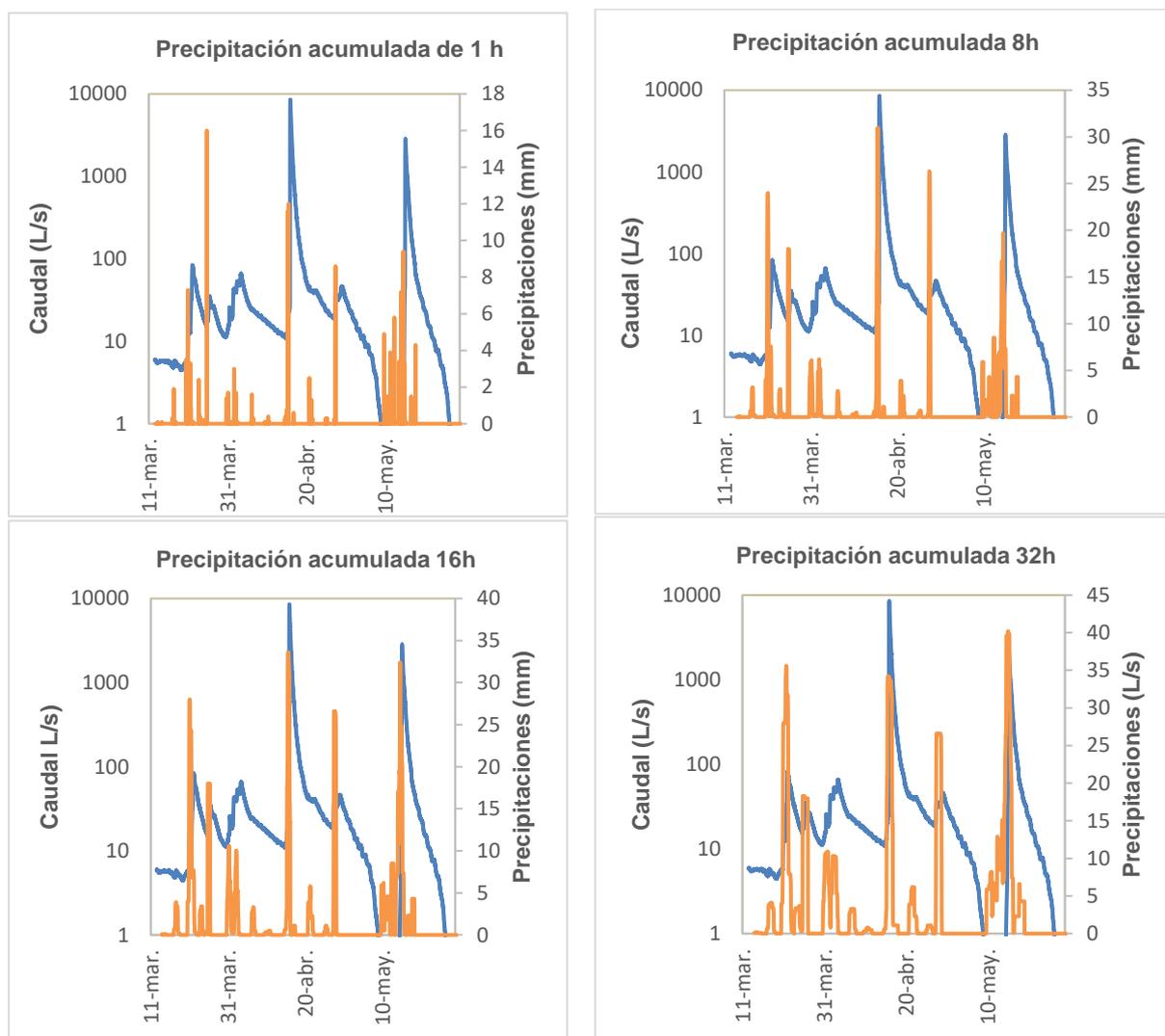
En la representación gráfica de las precipitaciones frente a los caudales se observa que no hay ninguna correlación (Fig.- 35). Al igual que en ALF-A, se intentó el desplazamiento de las series de datos para ver si se conseguían mejores relaciones, pero tampoco dio buenos resultados. Por todo ello probamos a correlacionar los caudales con las precipitaciones previas acumuladas con distintos periodos de tiempo (Figs.- 33 y 34).



**Figura 35:** Representación de la precipitación frente a los caudales en ALF-B (datos horarios).

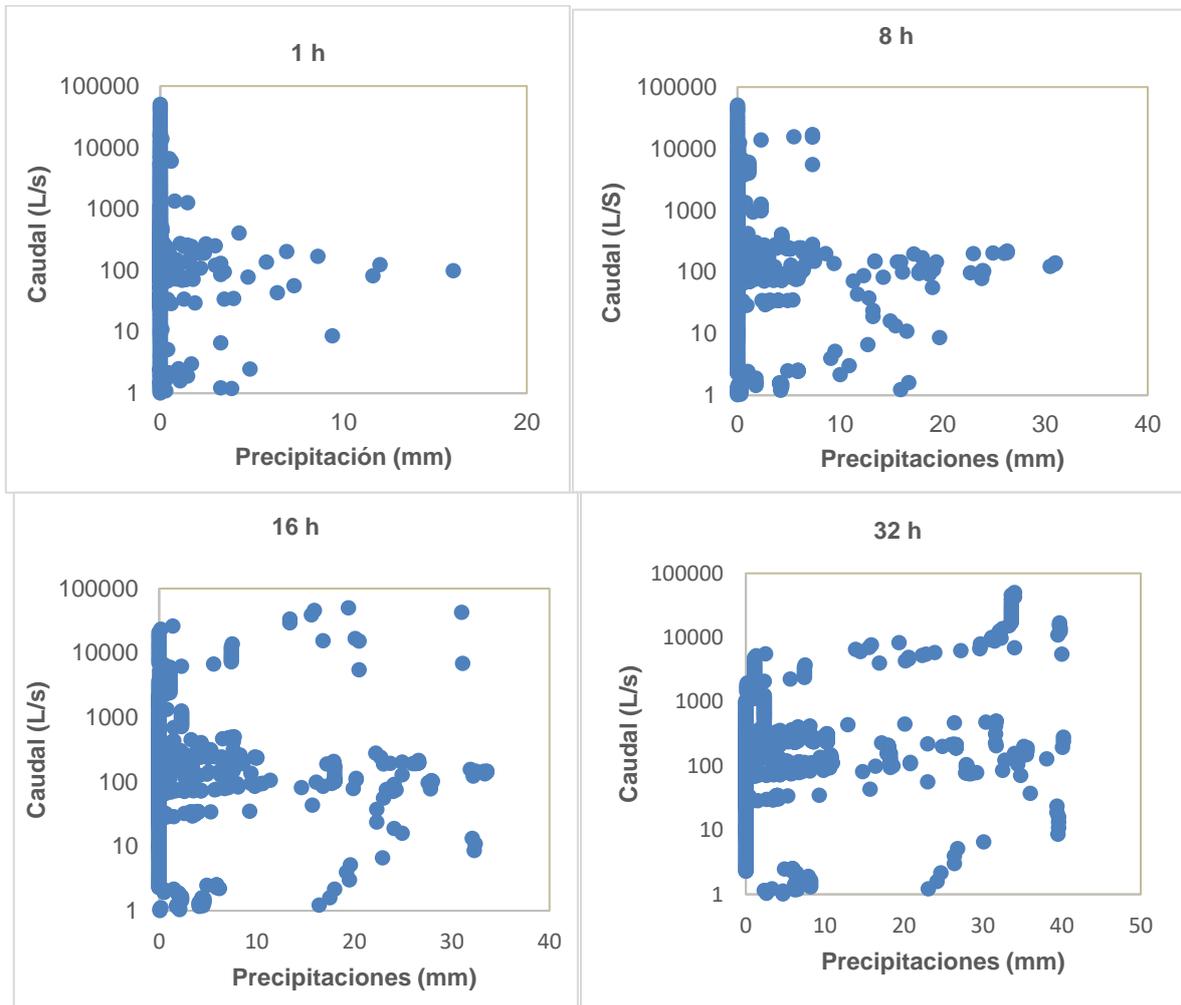
### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)

En la figura 36 se muestra la relación entre precipitación (1, 8, 16 y 32 horas) frente a los caudales, tampoco proporcionan buenas relaciones. Ello se debe a que la serie de las precipitaciones acumuladas tienen una forma de ascensos y descensos muy bruscos y muy diferentes a las series de caudales como ya se indicó en el punto ALF-A (Fig.- 37). Para intentar mejorar las correlaciones se realizó una ‘modulación’ de las precipitaciones multiplicando los valores de precipitaciones cada hora por unos coeficientes. Se ha realizado el mismo proceso que en ALF-A y se han utilizado los mismos coeficientes para calcular la precipitación modulada.



**Figura 36:** Representación de la evolución del caudal (azul) y precipitaciones (rojo) en el punto ALF-B. La primera gráfica indica la evolución del caudal y la precipitación previa en 1 hora, la segunda el caudal y la precipitación previa acumulada en 8 horas, la tercera la precipitación acumulada en 16 horas y la cuarta la precipitación acumulada en 32 horas.

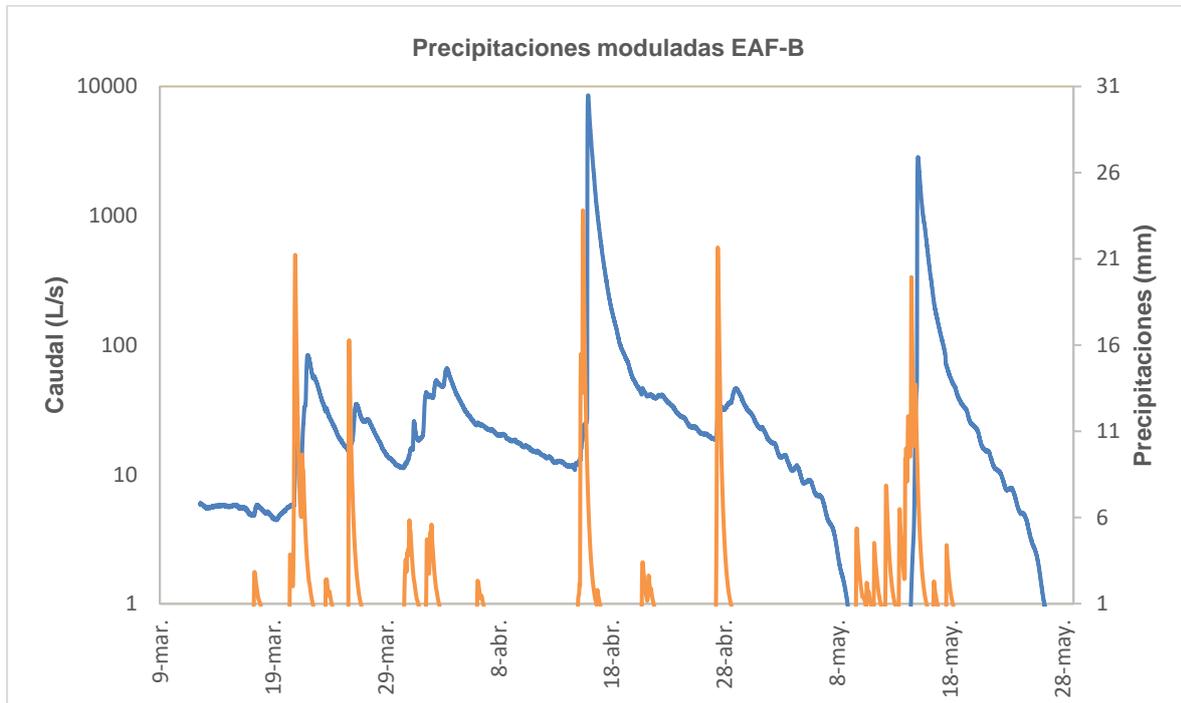
**Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)**



**Figura 37:** Representación de los datos de caudal frente a la precipitación previa acumulada en 1, 8, 16 y 32 horas en ALF-B .

En la figura 38 se muestra como se ha conseguido que la serie de las precipitaciones acumuladas tenga una forma parecida al caudal durante la crecida.

### Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)



**Figura 38:** Representación gráfica entre la precipitación modulada acumulada (línea naranja) y los datos de caudales (línea azul) en el punto ALF-B.

En la figura 39 se ha representado la precipitación modulada frente a los datos de caudal. Se puede observar como no existe una buena relación, ya que es un modelo simplificado en el cual no se ha tenido en cuenta datos de la humedad del suelo previo a las precipitaciones, la aproximación debería ser mejorada en futuros trabajos.

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznaicóllar, Sevilla)

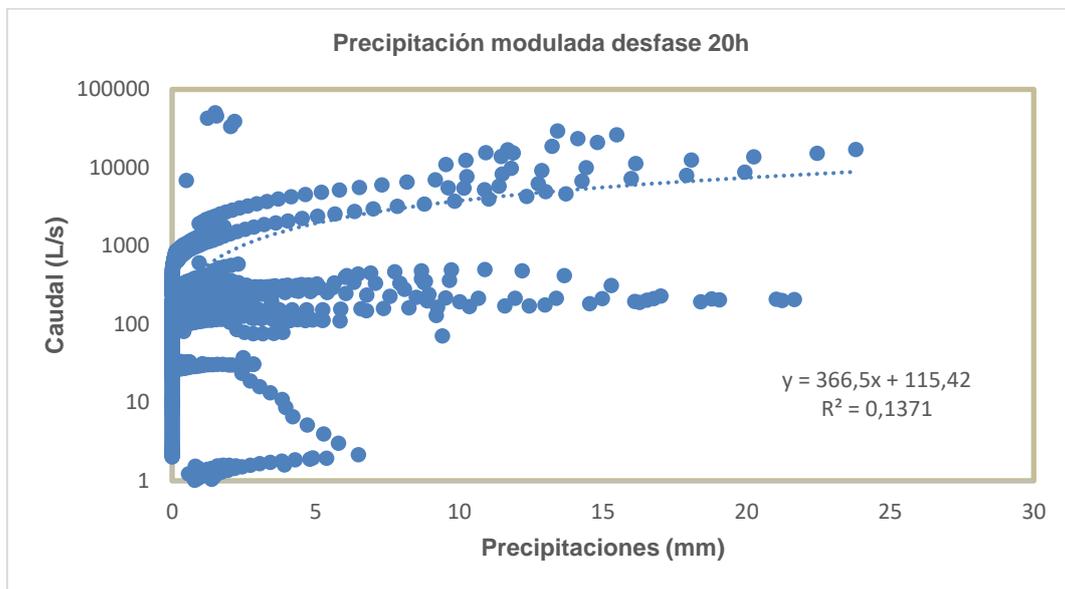


Figura 39: Representación de los datos de precipitación modulada frente a los datos de caudal, en ALF-B.

## 5. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se han obtenido de este trabajo son las siguientes:

- La subcuenca del arroyo de Los Frailes tiene una superficie de 76 km<sup>2</sup>, con un eje principal bien definido en dirección Norte-Sur. Los principales afluentes de Los Frailes son los arroyos Tamujoso y Cubillo. La longitud del arroyo de Los Frailes es de 26 km con una cota máxima 198 m y mínima 59 m.
- Los materiales más abundantes que afloran en la subcuenca del arroyo de Los Frailes son pizarras y cuarcitas del grupo PQ, seguidos de gabros, dioritas y tonalitas del grupo CVS. En menor proporción aparecen lavas, piroclastos, tobas y tufitas del CVS, granitos situados en la zona septentrional de la subcuenca y calcarenitas, arenas y margas en la parte sur.
- Los usos de suelo más importantes son: bosques frondosos, matorrales esclerófilos, sistemas agroforestales y matorrales boscosos en transición.
- La precipitación media anual ronda los 500 mm.

Respecto a los datos estudiados en este trabajo de los puntos ALF-A y ALF-B, se han obtenido las siguientes conclusiones. En ambos se han estudiado dos crecidas de los caudales y su relación respecto a las precipitaciones.

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

- En la primera crecida de ALF-A de 29 de abril de 2020 a las 14:00, se obtuvo un caudal máximo de 104 L/s, producido por precipitaciones de 8.5 mm a las 10:00 de 2020. La respuesta se produce con un desfase de 4 horas.
- La primera crecida del punto ALF-B se produce el 16 de abril de 2020, con un caudal máximo de 8287 L/s. El aumento de caudal fue causado por precipitaciones previas de 23.6 mm.
- La segunda crecida de ALF-A es mayor que la primera crecida, el caudal máximo se alcanza el 16 de mayo a las 10:00 de 2020 con 713 L/s, producido por precipitaciones del 15 de mayo con máximos de 9.4 mm a las 15:00 de 2020, con un desfase de unas 19 h.
- La segunda crecida de ALF-B se produce el 15 de mayo de 2020 a las 06:20 con un caudal de 2638 L/s, producido por precipitaciones del 14 de mayo que asciende a un total de 19.9 mm. La respuesta del caudal ante las precipitaciones se produce con un desfase de 13 h. Aunque las precipitaciones previas son mayores que en la primera crecida en este mismo punto, el caudal es menor, lo que puede estar producido por las mayores temperaturas y evapotranspiración.
- Existen inconsistencias entre los caudales de ALF-A y ALF-B que probablemente se deben a imprecisiones de las curvas de gastos.
- Las correlaciones entre las precipitaciones y caudales a nivel horario no son buenas, incluso utilizando la precipitación acumulada modulada, ya que el modelo es simplificado y no tiene en cuenta datos como la humedad del suelo previo a las precipitaciones, para futuros trabajos esta aproximación debería ser mejorada. Así mismo, se debería ampliar la longitud de las series de caudales para conseguir resultados más representativos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aliaga, R., Sahuquillo, A., Custodio, E. 2004. Estimación de parámetros hidrogeológicos en una formación de baja permeabilidad empleando datos de estación de aforos fluviales. Boletín Geológico y Minero, 115, 331-340.
- Almodóvar, G.R.; Yesares, L.; Sáez, R.; Toscano, M.; González, F.; Pons, J.M. 2019. Massive Sulfide Ores in the Iberian Pyrite Belt: Mineralogical and Textural Evolution. Minerals, 9, 653.
- Alonso, F., Donaire, T., García, E., González, F., González, M.J., Mantero, E., Moreno, C., Pascual, E., Ruiz de Almodóvar, G., Sáez, R., Sierra, S., Toscano, M. y Valenzuela, A. 2012. Geología en la zona Surportuguesa (Andévalo). Geología de la provincia de Huelva. idad de Huelva, 14-19.
- Azor Pérez, A., Martínez Poyatos, D.J., Martínez Poza, A.I., Simancas Cabrera, J.F. 2012. La estructura varisca de la Unidad del Pulo do Lobo (SO del Macizo Ibérico en las transversales de Aroche y Rosal de la Frontera (Huelva). Geogaceta, 52, 21-24.
- Bastida, F., Aller, J., Alonso, J.L., Martínez Catalan, J.R. 2008. The Iberian Varician Orogene. Chapter 1 García Cortes, A. (eds) Instituto Geológico y Minero de España, 13-30.
- Borja, F., López Geta, J.A., Martín Machuca, M., Mantecón, R., Mediavilla, C., del Olmo, P., Palancar, M. y Vives, R. 2001. Marco geográfico, geológico e hidrogeológico regional de la cuenca del Guadiamar. Boletín Geológico y Minero, 112, 13-34.
- Custodio, E., Gómez de las Heras, J., López Geta, J. A., Mediavilla y C., Sahuquillo, A. 2001. Comportamiento hidráulico y modelización hidrogeológica de las formaciones paleozoicas y miocenas de la cuenca del Guadiamar. Boletín Geológico y Minero. 112, 257-282.
- CHG 1998. Estudio hidrogeológico del río Guadiamar. Proyecto Doñana 2005. Actuación nº 8. Proyecto de control y permeabilización de la marisma de Doñana frente al río Guadalquivir, al Brazo de la Torre y a Entremuros (Ref. 06/98) Confederación hidrográfica del Guadalquivir. Anexo 1: 1-9.
- IGME 1982: Síntesis Geológica de la Faja Pirítica del SO de España. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 106 p.
- IGME 2003. ATLAS Hidrogeológico de la Provincia de Sevilla. Instituto Geológico y Minero de España y Diputación de Sevilla, 202 p.
- IGME 2010. Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Actividad 8: Selección e identificación de masas de agua donde es preciso plantear estudios y actuaciones de recarga artificial de acuíferos. Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, Informe Adicional 3, 39-49.
- IGME 2011. Estudio y modelización geoquímica de las aguas ácidas del lago minero de la corta Aznalcóllar. Memoria final. Ministerio de Educación y Ciencia, 197 p.
- Martín Parras, L.M. y Matas J., 2011. La Andalucía Varisca. En cartografía de recursos minerales de Andalucía (A. García-Cortés, Ed. Ppal.), IGME- Conserjería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía. Madrid, 12- 21.
- Moreno, C. 1993: Postvolcanic paleozoic of the Iberian Pyrite Belt: An example of basin morphologic control on sediment distribution in a turbidite basin. Journal Sedimentary Petrology, 63, 1118-1128.

## Análisis de la relación precipitación- escorrentía en el arroyo Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla)

- Oliveira, J.T. 1990: South Portuguese Zone: Introduction. Stratigraphy and synsedimentary tectonism, in: PreMesozoic Geology of Iberia. Dallmeyer R.D., Martínez García E. (eds) Springer Verlag, NÚMERO DE PÁGINAS
- Oliveira, J.T., Relvas, J.M.R.S., Pereira, Z., Matos, J.X., Rosa, C.J., Rosa, D., Munhá, J.M., Fernandes, P. Jorgue, R.C.G.S. y Pinto, A.M.M. 2013 Geologia Sul Portuguesa, com ênfase na estratigrafia, vulcanologia física, geoquímica e mineralizações da Faixa Piritosa. In: Dias, R.; Araújo, A.; Terrinha, P. & Kullberg, J.C. (Eds.). Geologia de Portugal, Volume 1, Geologia Pré-mesozóica de Portugal. Lisboa, Livraria Escolar Editora, 333-347.
- Quesada, C. 1997 A reappraisal of the structure of the Spanish segment of the Iberian Pyrite Belt. Mineral. Deposita 33, 31–44.
- Schütz, W.; EBNETH Ebneht, J. y MEYER Meyer, K.d 1987 Trondhjemites, tonalites and diorites in the South Portuguese Zone and their relations to the vulcanites and mineral deposits of the Iberian Pyrite Belt. Geologische Rundschau, 76, 201-212.
- Strauss GK, Madel J 1974 Geology of massive sulphide deposits in the Spanish - Portuguese pyrite belt. Geol Rundsch 63: 191 -211.

### **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo ha sido posible gracias a la ayuda de mis profesores, Manuel y Enrique, por orientarme en este largo camino y muy duro a veces. También mencionar a mis seres queridos que aunque haya sido un año duro, por fin ha salido a delante, muchas gracias a todos. Por último, y no menos importante dar las gracias a Minera Los Frailes S.L. por la oportunidad que me han dado con este trabajo.