

ARTÍCULOS / ARTICLES

ANÁLISIS Y MODELIZACIÓN DE LOS CAMBIOS EN LA INUNDABILIDAD TRAS EL INCENDIO FORESTAL DE SIERRA BERMEJA EN 2021 (PROVINCIA DE MÁLAGA, ESPAÑA)

Antonio Gallegos Reina

Universidad de Málaga

a.gallegos@uma.es

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2711-111X>

Recibido: 29/06/2022; Aceptado: 10/10/2024; Publicado: 12/02/2025

Cómo citar este artículo/citation: Gallegos Reina, Antonio (2024). Análisis y modelización de los cambios en la inundabilidad tras el incendio forestal de Sierra Bermeja en 2021 (Provincia de Málaga, España), *Estudios Geográficos*, 85 (297), 1254. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.2024.1254>

Resumen. En septiembre de 2021 se produjo en Sierra Bermeja (Málaga) uno de los mayores incendios forestales acaecidos en Andalucía en los últimos años. Más allá del daño biológico en una zona de gran importancia ecológica, en regiones mediterráneas existe también una correlación muy directa entre incendios e inundaciones. Este trabajo analiza la afección potencial que ha tenido el incendio sobre la inundabilidad en los municipios del entorno. Para ello, desarrolla dos líneas metodológicas, consistentes en evaluar la escorrentía previa y posterior al incendio, y modelizar diacrónicamente las láminas de inundación en las principales cuencas hidrográficas afectadas. Para orientar los estudios hidrológico-hidráulicos y para testar los resultados se ha tomado como referencia un evento tormentoso posterior al incendio, que ocasionó importantes inundaciones. Los resultados coinciden con los registros de dicho evento, por lo que la metodología podría ser de utilidad para orientar las acciones de gestión y ordenación territorial que las administraciones pueden y deben llevar a cabo tras grandes incendios en regiones mediterráneas.

Palabras clave: Escorrentía; modelización hidrológica; modelización hidráulica; gestión del territorio; regiones mediterráneas.

ANALYSIS AND MODELING OF CHANGES IN FLOOD SUSCEPTIBILITY FOLLOWING THE FOREST FIRE IN SIERRA BERMEJA IN 2021 (PROVINCE OF MÁLAGA, SPAIN)

Abstract. In September 2021, one of the largest fires experienced in Andalusia in recent years occurred in Sierra Bermeja. Beyond the biological damage, there is also a very direct correlation between forest fires and floods in Mediterranean regions. This paper analyzes the potential impact that the fire has had on flood susceptibility. To do so, it develops two methodological approaches, involving the evaluation of runoff before and after the fire, and the diachronic modeling of flood depths in the main affected river basins. Floods following the forest fire have been used as a reference to validate the results. The findings align with the data from these floods, indicating that the methodology could be useful in guiding the management and territorial planning actions that administrations can and should undertake following major forest fires in mediterranean regions.

Keywords: Runoff; hydrological modelling; hydraulic modelling; territory management; mediterranean regions.

INTRODUCCIÓN

El 8 de septiembre de 2021 se iniciaba un incendio en Sierra Bermeja, en el extremo sudoccidental de la provincia de Málaga (España). Tardó 17 días en poder ser extinguido, llegando a convertirse en uno de los mayores incendios forestales acontecidos en Andalucía en los últimos años, tanto por la extensión como por su intensidad. Sus consecuencias, dada la importancia ecológica de la zona¹, fueron muy notables, planteándonos una vez más que debemos rediseñar nuestra gestión y equilibrio con el territorio, especialmente en un contexto de cambio climático que previsiblemente aumentará la recurrencia de estos fenómenos. El episodio dejó casi 10.000 hectáreas calcinadas, una persona muerta y un escenario de cenizas que inevitablemente ha cambiado la calidad de vida de los vecinos de los municipios afectados y su proyección turística. No obstante, los efectos del incendio no terminan aquí, y seguidamente se encadenan una serie de importantes consecuencias en relación a otros riesgos naturales, especialmente la erosión de suelos y la inundabilidad. El presente trabajo se plantea estudiar dichas consecuencias en relación al riesgo de inundabilidad. Algunas de ellas ya han podido ser testadas tras un evento tormentoso ocurrido el 23 de marzo de 2022. Los resultados de dicho evento han servido en este artículo para focalizar los ríos y áreas a estudiar.

Basándonos en esta hipótesis de partida (la correlación que se produce entre distintos peligros naturales a partir de un hecho desencadenante), se han planteado un objetivo general y dos objetivos específicos. El objetivo general consiste en **cuantificar la afección potencial que ha tenido el incendio sobre la inundabilidad en los municipios del entorno de Sierra Bermeja**. Y los específicos son los siguientes:

- **Evaluar la escorrentía neta antes y después del incendio, en la zona afectada y en las cuencas fluviales que confluyen en dicha zona.** Para ello se ha considerado el umbral de escorrentía estimado antes y después del incendio, y la máxima lluvia diaria anual estadística.
- **Comparar las láminas de inundabilidad y otros parámetros hidráulicos en los tres ríos principales cuyas cuencas han sido afectadas por el incendio.** Para ello, se han realizado estudios hidrológico-hidráulicos en los tramos que se han visto más afectados por las lluvias de marzo de 2022.

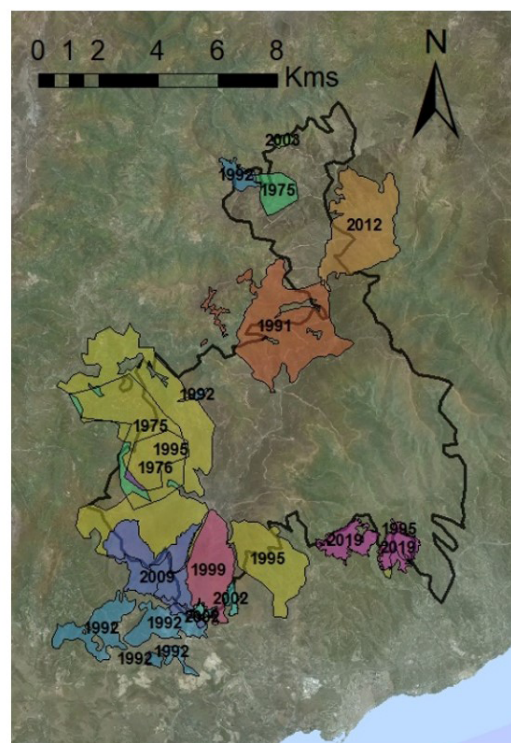
Para entender incendios como el de Sierra Bermeja debemos tener presente la acción combinada en las regiones mediterráneas del éxodo rural y la falta de gestión forestal. Esto ha desembocado en un significativo aumento de la carga de combustible forestal en sus montes, dando como resultado una creciente incidencia, en recurrencia e intensidad, de los incendios forestales (Alcasena et al., 2019, p. 573; Pausas & Fernández, 2012; Seijo y Gray, 2012). A ello deben sumarse, además, las condiciones meteorológicas extremas del clima mediterráneo y la afección del cambio climático por el aumento de temperaturas medias. La principal característica del clima mediterráneo es la coincidencia de la época seca con la cálida. En verano, el Mediterráneo se encuentra bajo la influencia de los anticiclones subtropicales secos, que se retiran en invierno hacia latitudes más bajas dejando paso a las borrascas atlánticas de latitudes templadas. Esta peculiaridad propicia que la vegetación se encuentre muy seca en verano, lo que junto a su naturaleza inflamable favorece la aparición y expansión de los incendios forestales (Bodi et al., 2012, p. 35; Naveh, 1991). Otros factores a tener en consideración han sido las repoblaciones de coníferas y el aumento de zonas residenciales en la interfaz urbano-forestal (Vallejo et al., 2009; Pausas et al., 2008).

Junto a lo anterior, el área mediterránea presenta precipitaciones escasas, pero frecuentemente de alta intensidad, y, además, de distribución muy irregular. Esto implica cursos de agua intermitentes con crecidas muy importantes. El cambio climático incide precisamente en estas características, reduciendo las precipitaciones medias y aumentando a su vez la torrencialidad (Olcina, 2020; Camarasa, 2020; Cortés et al., 2019, MedECC, 2019). Un futuro escenario más seco y de extremos, como se considera en las proyecciones climáticas del Mediterráneo occidental, podría conducir a un incremento en los periodos de retorno para la magnitud requerida de eventos de lluvia para generar caudales (Serrano, 2022, p. 1255; Blöschl et al., 2020). Frente a esta situación, conocer los umbrales de escorrentía a partir de los que se generan los flujos de inundación ayuda a abordar los peligros naturales a partir de una modelización hidrológica perspectiva (Kampf et al., 2018, p. 9948).

La conjunción de ambos peligros, incendios e inundaciones, actuando secuencialmente, son un elemento intrínseco de los ecosistemas mediterráneos. Las consecuencias en ocasiones son catastróficas a causa de la gran generación de escorrentía superficial que se produce (Ferreira et al., 2015; Shakesby, 2011).

FIGURA 1. INCENDIOS HISTÓRICOS (DESDE 1975) COINCIDENTES EN SUPERFICIE CON EL INCENDIO DE 2021

Año	Fecha inicio	Sensor	Municipio	Superficie incendio (has.)
1975		SENSOR MSS	Casares	866
1975		SENSOR MSS	Jubrique	143
1976		LANDSAT MSS	Casares	258
1991	21-may-91	LANDSAT 5 TM	Estepona	921
1992	30-jul-92	LANDSAT 5 TM	Farajan	72
1992		LANDSAT 5 TM	Genalguacil	14
1992	28-ago-92	LANDSAT 5 TM	Casares	544
1995	04-sep-95	LANDSAT 5 TM	Estepona	470
1995	12-sep-95	LANDSAT 5 TM	Estepona	98
1995	16-jul-95	LANDSAT 5 TM	Genalguacil	2319
1999	14-jul-99	LANDSAT 5 TM	Estepona	523
2002	06-ago-02	LANDSAT 5 TM	Estepona	20
2002	06-ago-02	LANDSAT 5 TM	Estepona	34
2003	08-ago-03	LANDSAT 5 TM	Farajan	22
2009	09-sep-09	LANDSAT 5 TM	Estepona	532
2012	04-feb-12	DEIMOS 1 SLIM 6	Pujerra	690
2019	19-ago-19	SENTINEL-2 L2A	Estepona	287
2021	8-sep-21	SENTINEL-2 L2A	Estepona	9640



Fuente: Dirección general del medio natural. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (2022)

La hidrofobicidad causada por los incendios en los suelos forestales incrementa la escorrentía y la erosión hídrica. Según Francos et al. (2016), la acumulación de cenizas, la volatilización de compuestos orgánicos durante la combustión y su posterior condensación alrededor de los agregados del suelo, pueden inducir a formar una capa repelente al agua. Este hecho se producirá en el caso de que la temperatura del suelo durante el incendio incremente hasta los 200-250 °C (Osborn et al. 1964). Entre los efectos de la repelencia al agua, cabe destacar la disminución de la humedad del suelo disponible para las plantas, la incapacidad del suelo para infiltrar agua o, en el caso de una escorrentía elevada, el arrastre de suelos (Francos et al., 2016; Bodi, 2012, p. 45; Martin y Moody, 2001).

LOS GRANDES INCENDIOS FORESTALES DE SIERRA BERMEJA EN LOS ÚLTIMOS 50 AÑOS

Atendiendo al registro de incendios forestales históricos de Andalucía, Sierra Bermeja es una de las zonas de la provincia de Málaga en la que se han producido

incendios con mayor recurrencia (Fig. 1). Aquí confluyen importantes factores de peligrosidad, como la topografía del terreno, la carga y composición de los combustibles forestales, o algunos factores meteorológicos. Desde 1975, existe registro de 17 incendios que coinciden espacialmente con el propio perímetro del incendio de 2021 (Dirección general del medio natural de la Junta de Andalucía, 2022).

La peculiaridad geológica del macizo de Sierra Bermeja, conformado por peridotitas y serpentinas, da lugar a unas características biogeográficas y edáficas que han condicionado históricamente sus usos y aprovechamientos. Sus suelos han limitado las posibilidades agrícolas en la zona. No obstante, sí llegó a existir un uso humano derivado de la extracción de resina y de carbón vegetal para las industrias de Marbella y Málaga durante los siglos XVII y XIX. A lo largo del siglo XX, estos usos fueron abandonados, provocando la recuperación de la cubierta vegetal, pero también la proliferación de incendios forestales (Martínez Muriello et al., 2016, p. 5), algunos de ellos, de gran exten-

sión, aunque sin llegar a acercarse a la magnitud del de 2021.

Atendiendo a los datos del Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España (SIOSE), los principales usos del suelo en la zona afectada por el incendio de 2021 han sido los siguientes:

1. Formaciones arbóreas densas: coníferas, 22 924 266 m², 23,7 % del total superficial
2. Matorral disperso con pastizal, 14 062 260 m², 14,6 % del total superficial
3. Matorral denso, 11 159 496 m², 11,6 % del total superficial
4. Matorral disperso arbolado con coníferas dispersas, 10 198 557 m², 10,6 % del total superficial
5. Matorral disperso con pasto y roca o suelo, 9 897 355 m², 10,3 % del total superficial
6. Matorral disperso arbolado con coníferas densas, 7 580 877 m², 7,9 % del total superficial
7. Matorral denso arbolado con coníferas dispersas, 7 024 856 m², 7,3 % del total superficial

Corroborando todo lo anterior, Martos y Gómez, en el capítulo de libro 'Sierra Bermeja y los grandes incendios forestales', publicado pocos meses antes del incendio de 2021, afirmaban lo siguiente (Martos y Gómez, 2021, p. 392):

"Entre las sierras litorales malagueñas, Sierra Bermeja destaca por el elevado riesgo y la extrema intensidad en cuanto a los incendios forestales se refiere. Si bien algunos factores naturales contribuyen a la génesis y propagación del fuego (una densa biomasa altamente combustible, una topografía accidentada con acusadas pendientes y numerosos valles encajados, el azote casi permanente de los fuertes vientos que canaliza el estrecho de Gibraltar o las elevadas temperaturas que se alcanzan en la época estival), las causas no son solo de orden natural. Existen importantes implicaciones económicas y sociales en el origen de estos desastres. La evolución creciente de los incendios forestales refleja con claridad la existencia de conflictos y tensiones de diversos órdenes en Sierra Bermeja: marginalidad social de los pueblos colindantes, precariedad económica de los aprovechamientos, problemas asociados a la titularidad-propiedad de los montes, despoblación de áreas rurales, sobrepresión por turismo rural, abandono de fincas, quemadas agrícolas, cambios de uso del suelo, especulación urbanística y recalificaciones de suelos no urbanizables, son hechos que se traducen en la aparición frecuente de incendios, la mayoría de ellos intencionados."

EL EPISODIO TORMENTOSO DEL 23 DE MARZO DE 2022

El evento tormentoso acaecido el 23 de marzo de 2022 dejó en Sierra Bermeja precipitaciones de 167 l/m² en 24 horas (Red Hidrosur), lo que en la zona equivale aproximadamente a un periodo de retorno de 50 años. Las fuertes lluvias se dieron en toda la provincia, si bien fue precisamente en el área de estudio donde se produjeron con mayor intensidad, tal como, por otro lado, se corresponde con la media estadística de las máximas precipitaciones diarias en la provincia (Fig. 4).

Genalguacil, en la vertiente norte de Sierra Bermeja, fue uno de los municipios más afectados, quedando parcialmente incomunicado el núcleo urbano tras desbordar el río Almárchal en el cruce con la carretera MA-8302, que conecta el municipio con el litoral (Fig. 5). Además, unas 40 familias que viven en fincas y diseminados quedaron totalmente incomunicadas, 30 de ellas por el desbordamiento del río, y las restantes por desprendimientos y caída de árboles y piedras sobre la carretera (Europa Press, 2022). También se cortó, por desbordamientos, la misma carretera en el término municipal de Estepona (Protección civil Estepona, 2022).

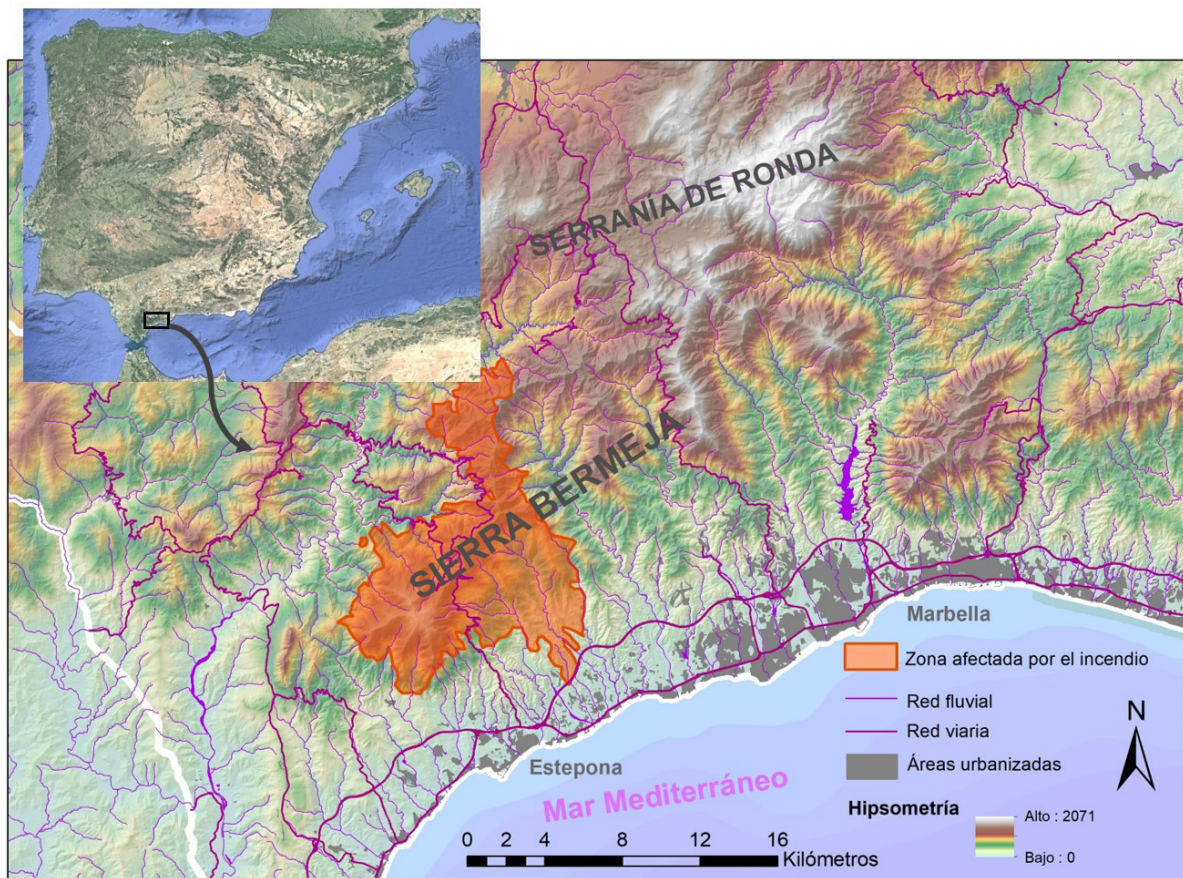
En cuanto a la vertiente sur, en el municipio de Estepona, también se produjeron numerosos incidentes por desbordamientos, cortándose distintos pasos de los ríos y arroyos Guadalobón, La Cala, Monterroso, El Infierno, Padrón, Abejeras, Guadalmanza, Castor, Vaquero y Velerín (Serrano, 2022). Sin embargo, el suceso más trascendente fue la muerte de un hombre que apareció en el cauce del río Padrón (Egea, 2022). Decenas de dotaciones del Consorcio de Bomberos, dependiente de la Diputación Provincial de Málaga, tuvieron que actuar durante toda la jornada (Naranjo, 2022).

ÁREA DE ESTUDIO

EL MACIZO DE SIERRA BERMEJA

El macizo de Sierra Bermeja se localiza en la provincia de Málaga (España), en las Alpujárrides occidentales, en la Zona Interna de las Cordilleras Béticas (Fig. 2). Se individualiza claramente dentro de estas por tratarse de un afloramiento peridotítico, procedente de las zonas profundas del interior de la tierra, que intruyen en la corteza y ascienden tectónicamente hasta la superficie (Serrano y Guerra, 2004, p. 63). Estos afloramientos representan uno de los conjuntos de rocas ígneas ultrabásicas de mayor extensión

FIGURA 2. LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO



Elaboración propia

a escala mundial, y da el característico color rojizo a la sierra. La toxicidad del sustrato ha limitado la existencia de zonas de cultivo o núcleos de población, encontrándose en su mayor parte cubierto por formaciones arboladas densas (coníferas) y matorral disperso con pastizal. Más allá de los relieves escarpados de la sierra, hacia el sur las pendientes se suavizan a media ladera, en los materiales del Maláguide, y más aún en la proximidad de la costa, en el *flysch* del Campo de Gibraltar.

Su peculiaridad geológica da lugar a un buen número de endemismos vegetales, únicamente comparables en número en Andalucía con el Parque Nacional de Sierra Nevada, y da lugar igualmente a la diferenciación de un sector biogeográfico propio (sector Bermejense). Dentro de esta riqueza florística destaca el pinsapar de Los Reales, el único del planeta sobre peridotitas, que llegó a ser afectado parcialmente por el incendio forestal. También se puede encontrar, no

obstante, pino negral, alcornoques, quejigos, encinas, coscojas y rebollos.

En Sierra Bermeja, la red fluvial se adapta a las líneas débiles del sistema de diaclasas y fallas, siendo frecuentes los tramos rectilíneos quebrados por bruscos codos, así como las cascadas y saltos de agua que salvan las rupturas de pendientes (Gómez Zotano et al., 2014). En la zona afectada por el incendio, nacen numerosos arroyos, algunos con dirección sudoriental, que drenan directamente hacia el mar, y otros con dirección noroccidental, que vierten sus aguas al río Genal. Por importancia, en relación a la extensión de la cuenca y el porcentaje de superficie afectada por el incendio, destacan el arroyo del Padrón y el río del Castor hacia el mar, y el río Almarchal, hacia el valle del Genal.

FIGURA 3. CUENCAS FLUVIALES ANALIZADAS MEDIANTE ESTUDIO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO



Elaboración propia

CUENCAS DE LOS RÍOS ALMARCHAL, CASTOR Y PADRÓN

Se ha trabajado con tres cuencas fluviales en las que se ha estudiado la lámina de inundabilidad y otros parámetros hidráulicos según las condiciones previas y posteriores al incendio forestal. Estas cuencas son las del río Almarchal, afluente del río Genal, y las del río del Castor y arroyo del Padrón, vertientes ambos al mar Mediterráneo (Fig. 3). En este apartado se describen dichas cuencas, considerando las condiciones previas al incendio.

La **cuenca del río Almarchal** tiene una extensión superficial de 3792 hectáreas. No obstante, se ha situado el punto de caudal para el estudio hidrológico-hidráulico en el cruce con la carretera MA-8302, de Estepona a Genalguacil, y en dicho punto resulta una superficie de cuenca de 2283 hectáreas. La geología está compuesta por peridotitas, serpentinas y gneises, materiales de permeabilidad baja o muy baja, que generan un importante porcentaje de escorrentía. La erodabilidad a las escorrentías superficiales, no obstante, es baja. La cota máxima del río es de 1448 metros, y desciende en el punto de caudal tomado hasta los 358 metros, y ello en tan solo 7,3 kilómetros de curso fluvial, resultando una pendiente media del 14,93 %. El umbral de escorrentía, en condiciones pre-incendio, es de 113,7 l/m², de lo que resulta un tiempo de concentración ligeramente inferior a las 2 horas. Los usos del suelo predominantes son matorral con coníferas y quercíneas (62 %) y arbolado denso de coníferas (33 %). La superficie restante se corresponde con pastizales y formaciones riparias.

La **cuenca del río Castor**, que discurre entre la divisoria de aguas de Sierra Bermeja y el mar, alcanza una superficie de 2046 hectáreas, con una litología de peridotitas en su mayor parte, pero también de micaesquistos, mármoles y filitas en las zonas de Maláguide, y arenas y margas en la llanura costera. Principalmente se trata, pues, de materiales de baja o muy baja permeabilidad y erodabilidad. La cota máxima es de 1183 metros, con una longitud de cauce de 14,4 kilómetros y una pendiente media del 8,2 %. El umbral a partir del cual la lluvia se convierte en escorrentía es de 119,2 l/m², y el tiempo de concentración es de 3,67 horas. Un 59 % de su superficie es matorral arbolado (coníferas, principalmente), y un 30 % son formaciones densas de coníferas. El resto está compuesto por un mosaico de usos que aglutina cultivos, formaciones riparias, zonas construidas y dunas y arenales.

En último lugar, la **cuenca del arroyo del Padrón** tiene una superficie de 2251 hectáreas, que descienden desde el pico de los Reales, a 1.448 metros, hasta el mar. La longitud del cauce es de 13,3 kilómetros y su pendiente media del 10,9%. De manera similar a la cuenca anterior, está compuesta en su mitad septentrional por peridotitas, y luego por mármoles, micaesquistos y arenas. El matorral arbolado supone un 59 % de la superficie, y las formaciones densas de quercíneas un 19 %. Le siguen en importancia, aunque con mucha menor representatividad, las zonas residenciales e infraestructuras, los cultivos y los pastizales. Antes del incendio, eran necesarios de media 97 l/m² para generar escorrentía, y el tiempo de concentración era de 3,26 horas.

MATERIAL Y MÉTODOS

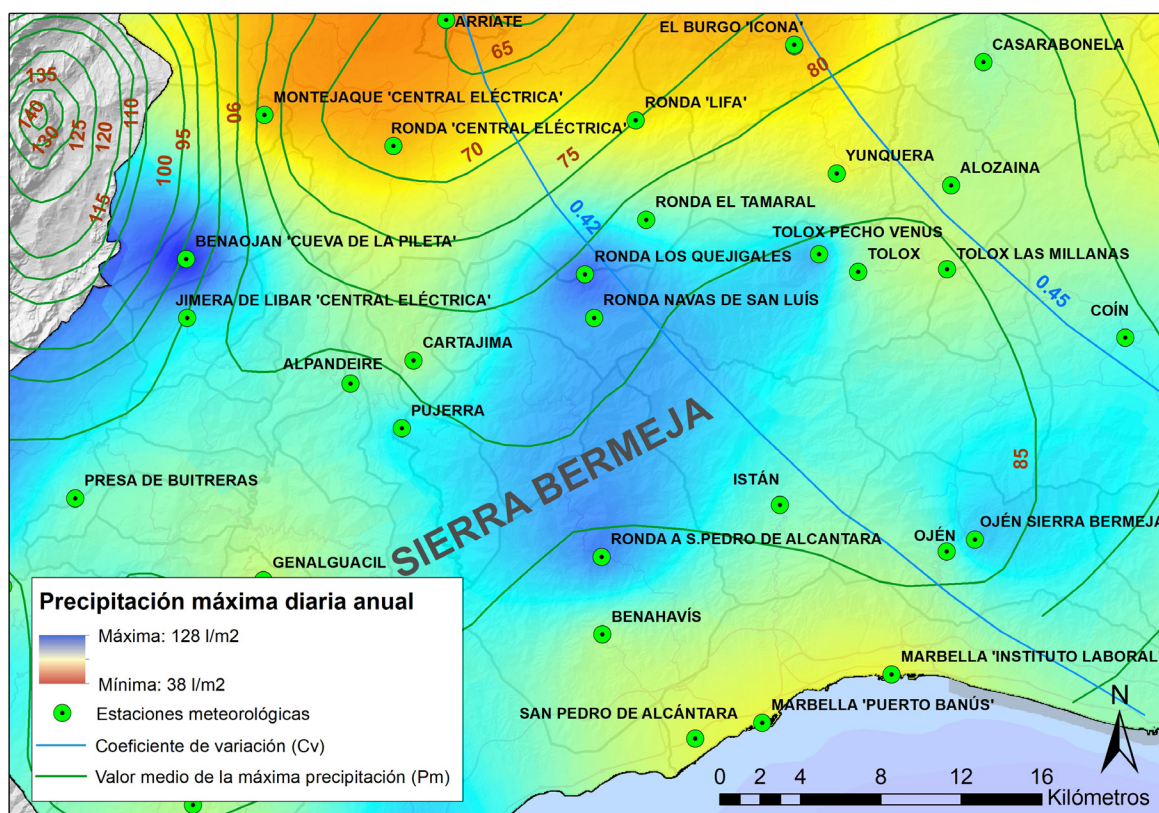
Para el presente trabajo se han seguido dos líneas metodológicas que responden respectivamente a los dos objetivos parciales marcados, y que confluyen ambas en el objetivo último: la evaluación de la inundabilidad en el entorno de Sierra Bermeja antes y después del incendio de 2021.

Para el primer objetivo, la evaluación de la escorrentía neta, se ha trabajado con cartografía ráster, en celdas de 10 x 10 metros, calculando por un lado la máxima lluvia diaria anual esperable en cada celda, y por otro lado la capacidad de infiltración antes y después del incendio en esa misma celda. Conociendo el momento a partir del cual el suelo genera escorrentía y la precipitación estimada en un evento tormentoso estadístico, se puede estimar la escorrentía generada. Y esta escorrentía es comparada antes y después del incendio de 2021.

Atendiendo al segundo de los objetivos parciales, se han realizado diversos estudios hidrológico-hidráulicos, pre y post-incendio, en las tres cuencas fluviales principales del entorno del área incendiada. La elección de las cuencas se ha realizado considerando tres parámetros:

- La extensión superficial de las cuencas y la capacidad de generación de caudal de sus cursos fluviales
- El porcentaje de superficie de las cuencas afectado por el incendio
- El análisis de las principales problemáticas por inundabilidad acontecidos tras el episodio tormentoso que se dio en la zona en el mes de marzo de 2022

FIGURA 4. CARTOGRAFÍA DE ELABORACIÓN DE LA MEDIA ANUAL DE LA MÁXIMA PRECIPITACIÓN DIARIA EN LA ZONA DE TRABAJO



Elaboración propia. Fuente: Ministerio de Fomento (1999)

Ambas líneas metodológicas complementan sus resultados para permitir obtener una visión más completa y cercana a la realidad de la peligrosidad por inundabilidad en los municipios del entorno de Sierra Bermeja.

PREVIO: OBTENCIÓN DEL ÁREA AFECTADA POR EL INCENDIO FORESTAL

Antes de iniciar el proceso metodológico ha sido preciso definir el perímetro del incendio, que se ha obtenido digitalizando la información específica ofrecida por la empresa consultora 'Agrón', mediante la aplicación del índice NBR (*Normalized Burn Ratio*) a imágenes de satélite (Sentinel 2), previas y posteriores al episodio. Este índice permite resaltar áreas quemadas haciendo uso de una fórmula que combina el uso de longitudes de onda de infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR). La diferencia entre las respuestas espectrales de la vegetación saludable

y las áreas quemadas alcanzan su pico en dichas regiones NIR y SWIR del espectro (Keeley, 2009).

ESCORRENTÍA NETA PRE Y POST-INCENDIO

La escorrentía neta es aquella que cabe esperar en caso de una precipitación de carácter torrencial considerando la media anual de la máxima lluvia diaria en un punto concreto y la capacidad de infiltración del suelo en ese mismo punto. Se ha calculado este valor usando cartografía ráster, con un tamaño de celda de 10 x 10 metros, lo que permite obtener tanto un mapa continuo de la escorrentía, como unos valores estadísticos medios y totales para la zona que quiera considerarse, ya sea el propio perímetro afectado por el incendio, los municipios de su entorno u otras áreas concretas, como cuencas fluviales.

El valor de precipitación máxima diaria anual se ha obtenido a partir de la información recopilada por la publicación 'Máximas lluvias diarias en la España peninsular' (Ministerio de fomento, 1999), trabajando

con las estaciones meteorológicas de la mitad occidental de la provincia de Málaga, y habiendo descartado todas aquellas con series de datos inferiores a 20 años (Fig. 4). Vendría a corresponderse con el día de mayor pluviosidad estadística del año, considerando el mismo periodo de 24 horas que se usa para realizar los análisis hidrológicos en estudios de inundabilidad. Los datos se han interpolado mediante el método de *krigeado*, que pondera los valores medidos circundantes para calcular la predicción de ubicaciones sin medición, estimando con ello la variación espacial continua que se presupone en el comportamiento de las precipitaciones (Gallegos, 2013, p. 61).

De otro lado, la capacidad de infiltración se ha obtenido mediante el umbral de escorrentía, usando el método del número de curva del *Soil Conservation Service* (USSCS, 1972). Éste, modificado y adaptado para el caso español por Témez (1991), es ampliamente utilizado por la facilidad para estimar sus parámetros a partir de criterios accesibles, como la pendiente, los usos del suelo, sus características hidrológicas o una clasificación basada en la potencia, textura y drenaje del suelo, y que se ha sintetizado a partir de la litología (Gallegos y Perles, 2019, p. 7). Su aplicación en España está regulada por la Instrucción 5.2-IC de drenaje superficial, del Ministerio de Fomento (2017). El mapa de cubierta vegetal y usos del suelo ha sido recalculado a la situación post-incendio para obtener sendas cartografías diacrónicas del umbral de escorrentía. Las adaptaciones de los usos del suelo y la geología a los valores recogidos en las tablas de la citada instrucción se han realizado atendiendo a las tablas propuestas por la Agencia Catalana del Agua, que realiza una correlación de códigos utilizados en la cartografía de usos de suelo editada por el Institut Cartogràfic y Geològic de Catalunya (Agència Catalana de l'Aigua, 2003).

Finalmente, conociendo la media anual de la máxima precipitación diaria y el umbral de escorrentía se obtiene la escorrentía neta, en litros/m², para cada celda de trabajo. Analizando esta cartografía se puede advertir tanto la distribución superficial de las principales zonas de escorrentía y generación de inundaciones, como la comparativa diacrónica entre los escenarios pre y post-incendio.

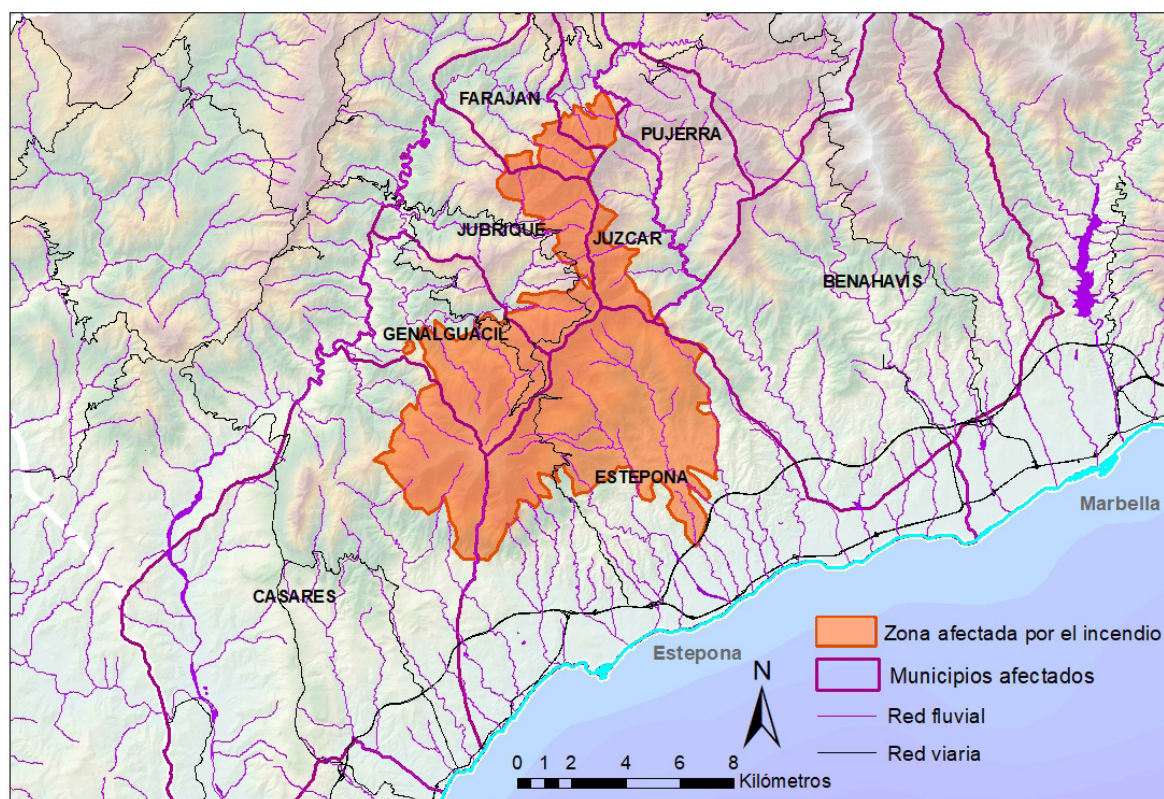
LÁMINAS DE INUNDABILIDAD Y OTROS PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN 3 CUENCAS FLUVIALES AFECTADAS POR EL INCENDIO

El reciente episodio tormentoso acaecido en la zona de estudio el 23 de marzo de 2022 generó una serie de desbordamientos, cortes de carreteras, daños en infraestructuras e incluso el fallecimiento de una persona, que apareció muerta en el cauce del arroyo del Padrón. Todo ello ha sido ampliamente documentado en la prensa local y regional, lo que permiten identificar los puntos donde las afecciones por inundación han sido más graves. Así, se han seleccionado 3 tramos fluviales en los que realizar un estudio hidrológico-hidráulico comparativo pre y post-incendio. Éstos son los tramos de desembocadura del río del Castor y del arroyo del Padrón, y el tramo del río Almarchal intersectado por la carretera MA-8302, entre Estepona y Genalguacil.

El análisis hidrológico-hidráulico en las cuencas fluviales seleccionadas se ha realizado siguiendo la metodología habitual para la realización de estudios de inundabilidad recomendada por la Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía. Se han realizado sendos estudios diacrónicos, considerando las condiciones antes y después del incendio. Para el estudio hidrológico se ha trabajado con un modelo hidro-meteorológico obtenido a partir de la precipitación total diaria del área de estudio según la publicación 'Máximas lluvias diarias en la España Peninsular (Ministerio de Fomento, 1999). El caudal máximo instantáneo de escorrentía superficial deriva de lo anterior mediante el 'método racional modificado', usando un periodo de retorno de 500 años. Este periodo de retorno, si bien es de baja probabilidad estadística, es el requerido habitualmente por la administración para establecer las zonas inundables y que deben quedar excluidas del desarrollo urbano. La modelización hidráulica se ha realizado con el software de libre uso HEC-RAS (versión 6.2), habiéndose obtenido tanto el área inundable como información estadística y cartográfica superficial de velocidad de flujo, calado y tensión cortante.

El coeficiente de *Manning* usado para el cauce ha sido 0,07, que sería el correspondiente a un cauce natural muy accidentado, incrementado para tener en consideración el importante aporte de material sólido edafológico que se debe prever para el caso concreto que nos ocupa. Más allá del cauce se ha adaptado este coeficiente a la vegetación o uso de suelo existente. Respecto a las condiciones de contorno, se ha trabajado con régimen mixto, por tratarse de ríos de montaña, pero también con puentes y entubamientos.

FIGURA 5. MUNICIPIOS AFECTADOS POR EL INCENDIO



Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESCORRENTÍA NETA PRE Y POST-INCENDIO

El incendio ha afectado a los municipios de Genalguacil (46,6 % de su término municipal), Jubrique (32,7 %), Estepona (32,4 %), Juzcar (22 %), Faraján (16,8 %) y Casares (8,5 %) (Fig. 5). En esta zona de la provincia de Málaga, las precipitaciones alcanzan cotas más elevadas que en la media provincial. Así, para el conjunto de municipios afectados, la media anual de las máximas lluvias diarias es de 82 l/m², frente a los 67 l/m² del conjunto provincial. El municipio con mayores precipitaciones de intensidad es Juzcar, con 86 l/m², y el de menor pluviosidad es Casares, con 77 l/m².

Frente a lo anterior, la tipología y densidad vegetal de la zona permite un alto grado de infiltración, con umbrales de escorrentía que oscilan entre los 76 l/m² de Estepona y los 96 l/m² de Faraján, con un valor medio para el conjunto de municipios afectados de 83

l/m² (Tabla 1 y Fig. 6). Tras el incendio, esta “protección frente a las inundaciones” en estos municipios se ha visto menguada en 22 l/m², lo que supone una reducción de la capacidad de infiltración del 27 %.

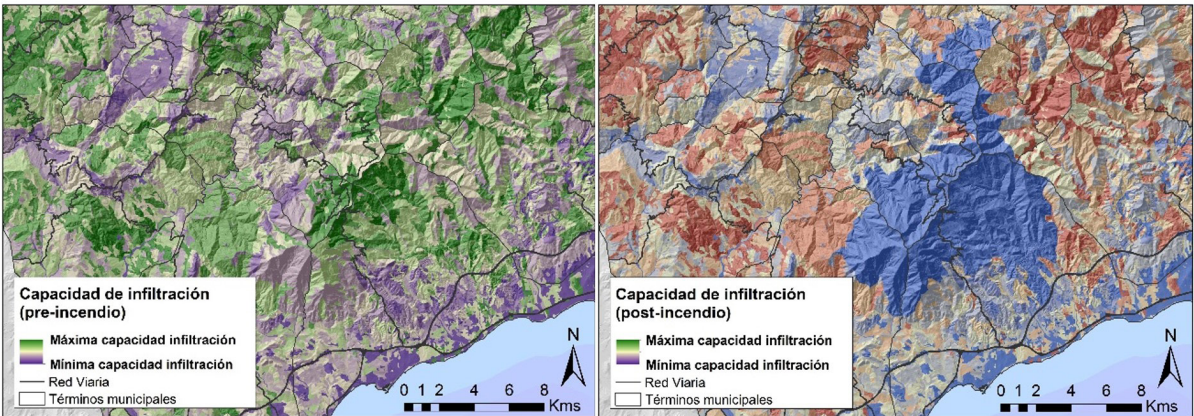
Más expresivo resulta calcular la escorrentía estimada en cada uno de los ámbitos espaciales considerados, teniendo en cuenta la máxima precipitación esperable en cada celda de trabajo y el coeficiente de escorrentía en ese mismo punto (Tabla 2). Transformado esto en estadísticas zonales para los distintos ámbitos analizados, nos encontramos que la escorrentía media en el conjunto de municipios afectados por el incendio sube desde 18 a 34 l/m². Respecto al total de escorrentía que cabe esperar para un evento tormentoso con una precipitación estadística equivalente a la máxima lluvia diaria del año, el incremento es muy notable, llegando a escurrir un 171 % de precipitación más de lo que lo haría en condiciones normales, previas al incendio. Este incremento es espe-

TABLA 1. RESULTADOS ESTADÍSTICOS DEL UMBRAL DE ESCORRENTÍA MEDIO ANTES Y DESPUÉS DEL INCENDIO

Ámbito espacial	Umbral de escorrentía medio (l/m ²)		Disminución de la capacidad de infiltración (l/m ²)	Porcentaje de la capacidad infiltración con respecto al original
	Antes del incendio	Tras el incendio		
Provincia de Málaga	70,5	69,2	1,3	98,1 %
Comarca Costa del Sol Occidental	65,8	58,8	7	89,3 %
Comarca Serranía de Ronda	90,3	87,3	3	96,6 %
Municipios afectados ²	82,7	60,6	22,1	73,3 %
Casares	83,9	64,4	19,5	76,7 %
Estepona	75,8	40,2	35,5	53,0 %
Faraján	96	82,5	13,5	85,9 %
Genalguacil	87,5	40,1	47,3	45,8 %
Jubrique	85,6	52,1	33,6	60,8 %
Júzcar	89,2	71	18,3	79,5 %

Elaboración propia

FIGURA 6. RESULTADOS CARTOGRÁFICOS ESPACIALES DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN LOS ESCENARIOS PRE Y POST-INCENDIO



Elaboración propia

cialmente significativo en el municipio de Genalguacil, donde la escorrentía casi se triplica.

Cabe tener presente que en esta modelización se está trabajando con un supuesto de máximos que no necesariamente debe cumplirse en la realidad. Así, para la estimación del umbral de escorrentía se ha trabajado con lo indicado por la Orden FOM/273/2016, por la que se aprueba la Instrucción de Carreteras. Esta norma establece un valor de escorrentía inicial para zonas quemadas (código 33 400) que oscila entre 4 y 15 l/m² (Ministerio de Fomento, 2017). No obstante, se ha trabajado homogéneamente para toda el área incendiada, si bien la afectación del incendio a la vegetación es irregular, pudiendo

existir zonas en las que este ha avanzado únicamente por las copas de los árboles, y los umbrales iniciales de escorrentía, por tanto, podrían ser matizados. De igual modo, se ha comprobado que las comunidades vegetales de los ecosistemas mediterráneos tienen una alta resiliencia a los incendios forestales (Bodi et al., 2012, p. 41; Lloret y Zedler, 2009), por lo que se produce una relativamente rápida transición entre lo que deberíamos considerar “zona quemada” y las subsiguientes coberturas del terreno. Así, debe considerarse que se trata de un modelo que sirve únicamente como aproximación teórica, si bien los resultados encajan con los daños y afecciones generadas por el episodio pluviométrico ocurrido en marzo de 2022.

TABLA 2. RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LA ESCORRENTÍA NETA Y ESCORRENTÍA TOTAL QUE CABE ESPERAR PARA UN EVENTO TORMENTOSO EQUIVALENTE A LA MEDIA ANUAL DE LA MÁXIMA LLUVIA DIARIA

Ámbito espacial	Escorrentía neta media (l/m ²)			Total de escorrentía (litros)			
	Antes	Después	Incremento	Antes	Después	Incremento	% incremento de la escorrentía neta
Provincia de Málaga	15,1	16,4	1,2	44 107 618	47 815 194	3 707 576	8,4
Comarca Costa del Sol Occidental	28,5	33,9	5,4	9 105 484	10 874 037	1 768 553	19,4
Comarca Serranía de Ronda	12,4	14,9	2,5	6 215 635	7 469 172	1 253 536	20,2
Municipios afectados	18,3	33,9	15,5	3 269 496	5 605 659	2 336 163	71,5
Casares	23,5	23,8	0,3	1 067 184	1 083 263	16 079	1,5
Estepona	27,7	51,3	23,7	1 511 718	2 810 085	1 298 367	85,9
Faraján	9,8	21,3	11,4	81 277	175 562	94 285	116,0
Genalguacil	15,8	44,6	28,7	199 801	561 784	361 983	181,2
Jubrique	14,1	37,7	23,6	220 496	589 420	368 924	167,3
Júzcar	14,1	28,9	14,7	189 021	385 545	196 524	104,0
Área del incendio	12,4	78,0	65,5	481 273	3 012 520	2 531 248	525,9

Elaboración propia

TABLA 3. ANÁLISIS HIDROLÓGICO DIACRÓNICO EN LAS CUENCAS DE ESTUDIO

	Padrón		Almarchal		Castor	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Precipitación total diaria (l/m ²)	266,1		276,5		265,9	
Superficie (has.)	2 251		2 283		2 046	
Longitud cauce (m)	13 271		7 367		14 434	
Cota cabecera (m)	1 448		1 448		1 183	
Cota intersección (m)	0		348		0	
Desnivel (km)	1 448		1 100		1 183	
Pendiente media (%)	10,9		14,9		8,2	
Tiempo de concentración (h)	3,3		2		3,7	
Intensidad media de la precipitación correspondiente al Tc (mm/h)	45,9		63,9		42,7	
Umbral de escorrentía (l/m ²)	97	24,5	113,8	31,3	119,2	14,6
Coefficiente de escorrentía	0,24	0,7	0,2	0,63	0,18	0,83
Caudal máximo instantáneo (m ³ /s)	85,2	248,6	92,6	291,6	55,3	255,1

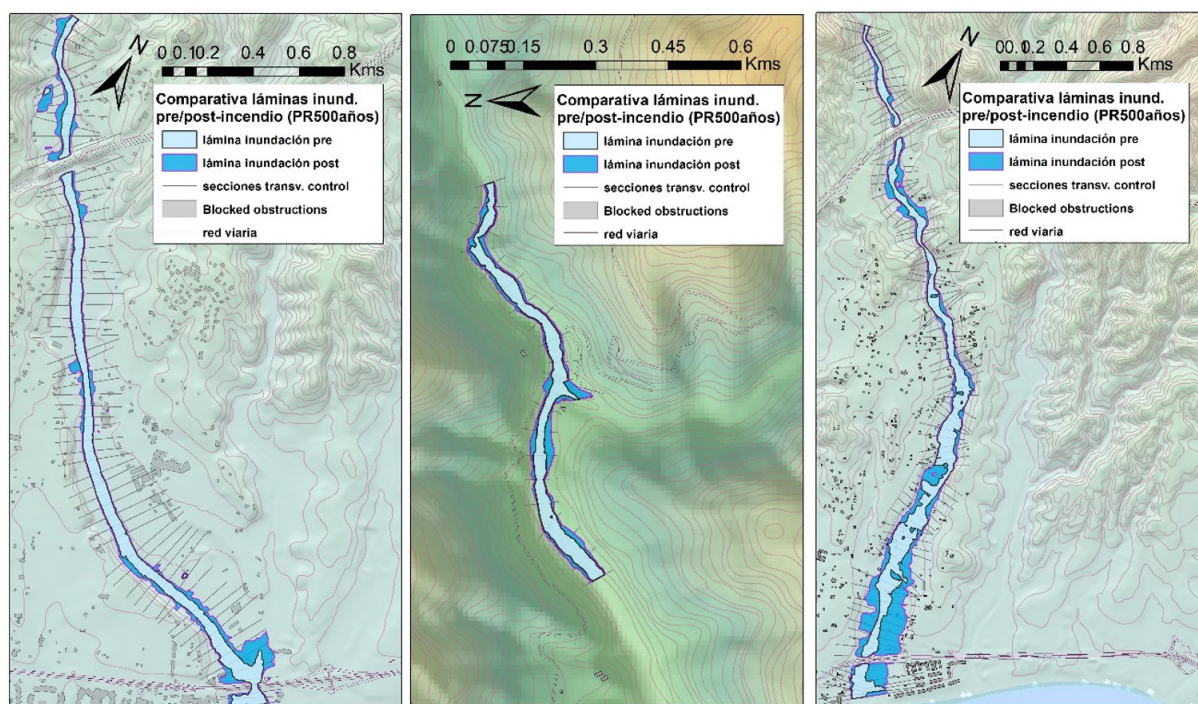
Elaboración propia

TABLA 4. ANÁLISIS HIDRÁULICO DIACRÓNICO EN LAS CUENCAS DE ESTUDIO: VALOR MEDIO DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE CONTROL

	Padrón			Almarchal			Castor		
	Antes	Después	Δ	Antes	Después	Δ	Antes	Después	Δ
W.S. Elev (m)	1,5	2,4	0,9	2,1	4,5	2,4	1,4	2,5	1,1
Vel Chnl (m/s)	1,9	2,7	0,8	3,0	3,3	0,4	1,6	2,5	0,8
Flow Area (m ²)	48,5	101,0	52,5	37,0	112,8	75,7	39,7	126,0	86,4
Top Width (m)	47,1	71,5	24,4	24,5	35,1	10,6	61,0	113,6	52,7
Shear Total (N/m ²)	164,9	228,2	63,3	321,2	410,3	89,1	124,0	229,9	105,9

Elaboración propia

FIGURA 7. COMPARATIVA DE LAS LÁMINAS DE INUNDACIÓN EN ESCENARIOS PRE Y POST-INCENDIO PARA LOS RÍOS PADRÓN (IZDA.), ALMARCHAL (CENTRO) Y CASTOR (DCHA.)



Elaboración propia

LÁMINAS DE INUNDABILIDAD Y OTROS PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN 3 CUENCAS FLUVIALES AFECTADAS POR EL INCENDIO FORESTAL

Las tres cuencas consideradas para hacer el análisis hidrológico-hidráulico han sido afectadas por el perímetro el incendio en mayor o menor medida, si bien en todos los casos la superficie quemada ha superado el 50 %. La de mayor afección es la cuenca del río del Castor, con un 84 % de la superficie quemada. Le sigue la cuenca del río Almarchal, con un 68 %, y en último lugar la del arroyo del Padrón, con un 58 % (Fig. 3). Los puntos de caudal se han tomado en la misma desembocadura para el río del Castor y el arroyo del Padrón, y en el cruce del río con la carretera MA-8302 para el río Almarchal.

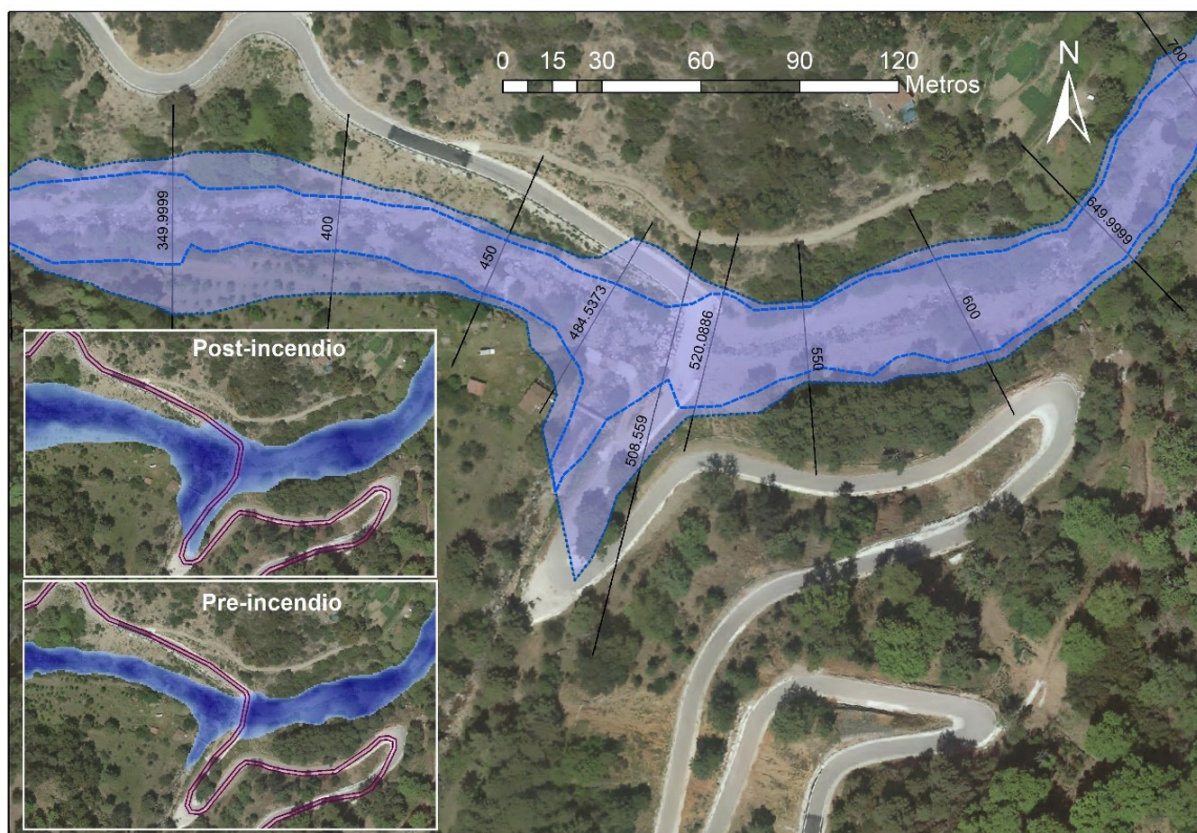
Los datos hidrológicos resultantes del estudio diacrónico realizado en cada una de las cuencas se pueden consultar en la tabla 3. Se ha trabajado con un periodo de retorno de 500 años. El caudal máximo instantáneo del río del Padrón pasaría de los 85 a los 249 m³/s. El arroyo del Castor aumentaría el caudal desaguado al mar desde los 55 a los 255 m³/s. Y el río Almarchal pasaría, en su cruce con la carretera de Estepona a Genalguacil, de llevar un caudal máximo de 92 m³/s a llevarlo de 292 m³/s.

Los resultados hidráulicos son muy explícitos. Tras haber realizado la media geométrica a la totalidad de las secciones transversales de control usadas en cada cauce, resulta un incremento medio de la lámina de agua entre 0,9 y 2,4 metros, un incremento de la velocidad del flujo de entre 0,4 y 0,8 m/s, y un incremento en la anchura media inundada entre 52 y 86 metros (Tabla 4). También es relevante conocer cómo cambia la tensión cortante del flujo, dado que, si esta supera la tensión crítica de los materiales de las orillas, o incluso de las infraestructuras de paso, se producirá un fenómeno de erosión que retroalimentará la carga sólida del caudal. Ésta se incrementa 63 y 106 N/m².

Atendiendo a la extensión superficial de las láminas de inundación, se observa que estas son aproximadamente un 150 % de las resultantes en la situación pre-incendio (152 % para el arroyo del Padrón, 148 % para el río Almarchal y 183 % para el río del Castor) (Fig. 7).

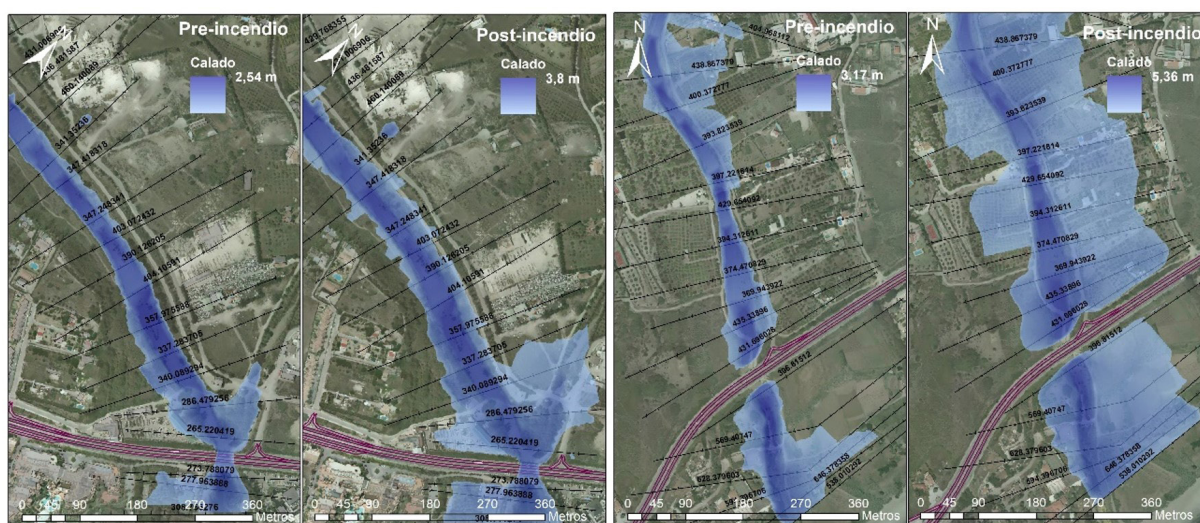
Focalizando los resultados sobre las zonas que específicas en las que se produjeron desbordamientos y otras problemáticas tras el episodio tormentoso del 23 de marzo de 2022, se puede apreciar como el río Almarchal colapsa las obras de paso de la carre-

FIGURA 8. COMPARATIVA DE LAS LÁMINAS DE INUNDACIÓN Y RÁSTER DE CALADO EN EL CRUCE DEL RÍO ÁLMARCHAL CON LA CARRETERA MA-8302



Elaboración propia

FIGURA 9. COMPARATIVA DE LOS RÁSTER DE INUNDACIÓN Y CALADO ANTES Y DESPUÉS DEL INCENDIO, EN LAS DESEMBOLCADURAS DEL ARROYO DEL PADRÓN (IZDA.) Y DEL RÍO CASTOR (DCHA.)



Elaboración propia

tera MA-8302 (consistente en 11 tubos³ en paralelo, de 80 centímetros de diámetro cada una), generando un desbordamiento de la lámina que cubre un tramo de 400 metros de la carretera (Fig. 8), tal como puede apreciarse que ocurrió en el citado evento observando los vídeos existentes de dicho día.

De manera similar, en la modelización post-incendio de los tramos finales y desembocaduras de los ríos Castor y Padrón se observan láminas de inundación muy superiores a la equivalente en condiciones normales (Fig. 9). Estas superficies son más acordes con las resultantes en el evento del pasado mes de marzo. Especialmente notable es el incremento de superficie inundada en el cauce del río del Castor, donde sus perfiles transversales y longitudinales generan un drenaje algo más lento y expansivo del flujo. En este último caso, dos decenas de edificaciones de distinta naturaleza aparecen cubiertas por la lámina de agua.

Debe resaltarse el hecho de que la Administración Hidráulica de la Junta de Andalucía dispone de deslindes de zonas inundables, con el mismo periodo de retorno, para los tres tramos estudiados. Éstos superan en extensión a los resultados obtenidos en este trabajo para el escenario pre-incendio. La razón es que para la elaboración de los estudios hidrológico-hidráulicos, la Junta de Andalucía limita determinados valores de coeficientes para mayorar la seguridad⁴. En este trabajo, donde se trata de modelizar situaciones lo más próximas posible a la realidad, no se han aplicado dichos límites a los coeficientes.

CONCLUSIONES

Este trabajo supone una aproximación que contribuye a conocer el modo en que un incendio forestal de las características del estudiado afecta potencialmente a las inundaciones en la zona, mediante distintas estrategias y modelaciones a diferentes escalas. La correlación entre incendios forestales e inundaciones en ámbitos mediterráneos ha sido ampliamente estudiada por numerosos autores, pero los trabajos se centran principalmente en las causas y características de esta relación, y no tanto en cuantificar dicha correlación. Medir y modelizar las escorrentías netas resultantes y su plasmación hidráulica sobre el terreno permiten orientar las acciones que las administraciones responsables pueden y deben llevar a cabo, mediante las herramientas de gestión y ordenación territorial. Es, asimismo, un trabajo que puede ser replicado en distintos casos, gracias al uso de materiales y métodos accesibles y estandarizados. Haber dispuesto,

además, de un modelo unievento (precipitaciones de marzo de 2022), acontecido a los pocos meses del incendio, permite orientar los análisis y testar los resultados. Tales resultados coinciden con los registros existentes en medios de comunicación y redes sociales respecto a dicho evento, apreciándose inundaciones en buena parte de los puntos citados por los medios de comunicación.

Hasta el pasado año, las masas boscosas de Sierra Bermeja constituían una excelente garantía contra las inundaciones en la vulnerable Costa del Sol Occidental (Gallegos, 2018). Su bajo coeficiente de escorrentía permitía atenuar los riesgos de las lluvias torrenciales. En los próximos años, y mientras el bosque, sotobosque y suelos no vuelvan a recuperar sus características previas al incendio, se debe estar prevenido ante futuros episodios torrenciales, y la información aquí aportada debiera ser de interés para ello.

El Cambio Global, que incrementa tanto la peligrosidad de incendios como de inundaciones, viene a incidir en la necesidad de actuar con investigación y modelaciones que reduzcan el creciente nivel de incertidumbre, para poder diseñar estrategias de adaptación adecuadas. De hecho, los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRIs) incluyen entre sus medidas de acción la “elaboración de estudios de mejora del conocimiento sobre la gestión del riesgo de inundación”.

Faltaría ahora realizar un estudio similar en relación a las pérdidas potenciales de suelo, que es el otro gran desastre derivado del incendio forestal, pues si bien la recuperación de la masa forestal es relativamente rápida en especies mediterráneas, la regeneración de los suelos es un proceso bastante más lento e incierto.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los/as autores/as de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Antonio Gallegos Reina: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agència catalana de l'aigua (2003): *Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local*. Barcelona: Agència Catalana de l'Aigua.
- Alcasena, F. J.; Vega, C.; Ager, A.; Salis, M.; Nauslar, N. J.; Mendizabal, F. J.; Castell, R. (2019). Metodología de evaluación del riesgo de incendios forestales y priorización de tratamientos multifuncionales en paisajes mediterráneos. *Cuadernos de investigación geográfica*, nº45 (2), 571-600. <http://doi.org/10.18172/cig.3716>
- Blöschl, G. et al. (2020): Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature*, 583, 560-566. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2478-3>
- Bodí, M., Cerdá, A., Mataix Solera, J., y Doerr, S. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos españoles*. Nº58. pp. 33-55. <https://doi.org/10.21138/bage.2058>
- Camarasa Belmonte, A. M. (2020): El riesgo de inundación en ramblas y barrancos mediterráneos. En *Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes* (pp. 325-331). Alicante: Ed. Universitat d'Alacant
- Cortés, M. et al. (2019): Changes in flood damage with global warming in the east coast of Spain. *Natural Hazards Earth*, 19, 2855-2877. <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-253>
- Domínguez Reguero, J. (10 de septiembre de 2021). Sierra Bermeja arde poco después de que se pidiese su inclusión en el Parque Nacional de la Sierra de las Nieves. *Eldiario.es*. https://www.eldiario.es/andalucia/sierra-bermeja-arde-despues-pidiese-inclusion-parque-nacional-sierra-nieves_1_8290275.html
- Egea, N. (26 de marzo de 2022). Localizan el cuerpo sin vida de un hombre en el río Padrón de Estepona. *Cadena Ser*. <https://cadenaser.com/2022/03/26/localizan-el-cuerpo-sin-vida-de-un-hombre-en-el-rio-padron-de-estepona/>
- Europa Press (25 de marzo de 2022). Cuarenta familias de Genalguacil siguen aisladas tras las lluvias. *La Opinión de Málaga*. <https://www.laopiniondemalaga.es/municipios/2022/03/25/cuarenta-familias-genalguacil-siguen-aisladas-64265288.html>
- Ferreira, A.J.D., Prats Alegre, S., Alves Coelho, C.O., Shakesby, R.A., Páscoa, F.M., Ferreira, C.S.S., Keizer, J.J. and Ritsema, C. (2015). Strategies to prevent forest fires and techniques to reverse degradation processes in burned areas. *Catena*, 128, 224–237. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.002>
- Francos, M., Pereira, P., Alcañiz, M., Mataix, J., Arce-negui, V., y Úbeda, X. (2016). Efecto de una lluvia torrencial post-incendio en la repelencia al agua y la velocidad de infiltración de un suelo en un ambiente mediterráneo (NE España). En Durán, J.J., Montes, M., Robador, A. y Salazar, A. (Eds.). *Comprendiendo el relieve: del pasado al future* (81-88). Málaga: Instituto Geológico y Minero de España.
- Gallegos Reina, A. y Perles Roselló, M.J. (2019). Relaciones entre los cambios en los usos del suelo y el incremento de los riesgos de inundabilidad y erosión: análisis diacrónico en la provincia de Málaga (1957-2007). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81, 1–38. <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2740>
- Gallegos Reina, A. (2013). Cuantificación y distribución cartográfica de la generación de escorrentía y sedimentos en la provincia de Málaga. *Baética*, 35: 57-74. Retrieved from <http://www.revistas.uma.es/index.php/baetica/article/view/57/26>
- Gallegos Reina, A. (2018). *Caracterización y análisis de los riesgos naturales en el planeamiento urbanístico del litoral mediterráneo español*. Málaga: UMA Editorial.
- Gómez Zotano, J., Román Requena, F., Hidalgo Triana, N. y Pérez Latorre, A.V., 2014. Biodiversidad y Valores de Conservación de los Ecosistemas Serpentinicos en España: Sierra Bermeja (provincia de Málaga). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 65: 187-206.
- Kampf, S. K., Faulconer, J., Shaw, J. R., Lefsky, M., Wagenbrenner, J. W., and Cooper, D. J. (2018): Rainfall Thresholds for Flow Generation in Desert Ephemeral Streams, *Water Resour. Res.*, 54, 9935–9950, https://www.fs.usda.gov/psw/publications/wagenbrenner/psw_2018_wagenbrenner005_kampf.pdf
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>

- Lloret, F. y Zedler, P. H. (2009): The effect of forest fire on vegetation», en *Fire effects on Soils and Restoration Strategies* (Cerdà, A. y Robichaud, P. R., coord.). Enfield, Edit. Science Publishers, 257-295.
- Martin, D.A. and Moody J.A. (2001). Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrological Processes*. 15, 2893-2903.
- Martínez Murillo, J.F., Remond, R., Hueso González, P., y Ruíz Sinoga, J.D. (2016). Resiliencia de la cubierta vegetal en un área de montaña mediterránea afectada por el fuego: el caso del incendio de Río Verde (Provincia de Málaga, Sur de España). *Pirineos*, 171, e024. <http://dx.doi.org/10.3989/pirineos.2016.171008>
- Martos Martín, J. y Gómez Zotano, J. (2021). Sierra Bermeja y los grandes incendios forestales: una reconstrucción geohistórica (1950-2018). En *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (Gómez Zotano, J. y Olmedo Cobo, J. A., coord.). 391-437. Málaga: Ed. La Serranía,
- MedECC (2019): *Risks associated to climate and environmental changes in the Mediterranean region. Preliminary assessment by the MedECC Network Science-policy interface*. <https://www.medecc.org/medecc-reports/booklet-preliminary-results-2019/>
- Ministerio de Fomento (1999). *Máximas lluvias diarias en la España peninsular*. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transporte. Dirección general de carreteras.
- Ministerio de Fomento (2017): *Orden FOM/185/2017, de 10 de febrero, por la que modifican la Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2-IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras y la Orden FOM/534/2014, de 20 de marzo, por la que se aprueba la norma 8.1-IC señalización vertical de la Instrucción de Carreteras*. BOE núm. 55 de 06 de Marzo de 2017.
- Naranjo, I. (23 de marzo de 2022). El «tren de borrascas» azota con fuerza disparando las incidencias en Andalucía. *La Razón*. <https://www.larazon.es/andalucia/20220323/vgqzscor7fajnf2a27xjn2d7ki.html>
- Naveh, Z. (1991). The role of fire in Mediterranean vegetation. *Botanika Chronika*, nº10, 386-405.
- Olcina Cantos, J. (2020): Clima, cambio climático y riesgos climáticos en el litoral mediterráneo. Oportunidades para la Geografía. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, vol. 66/1, 159-182. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.629>
- Osborn, J.R., Pelishek, R.E., Krammes, J.S., Letey, J. (1964). Soil wettability as a factor in erodibility. *Soil Science Society of America Proceedings* 28, 294-295.
- Pausas, J. G., Llovet, J., Rodrigo, A. y Vallejo, R. (2008). Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? A review. *International Journal of Wildland Fire*, nº 17, 713-723.
- Pausas, J.G., Fernández-Muñoz, S. (2012). Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Climatic Change* 110, 215-226. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0060-6>
- Protección Civil Estepona (25 de marzo de 2022). @PCivilEstepona
- Seijo, F., Gray, R. (2012). Pre-Industrial Anthropogenic Fire Regimes in Transition: The Case of Spain and its Implications for Fire Governance in Mediterranean Type Biomes. *Human Ecology Review* 19, 58-69.
- Serrano Notivoli, R., Martínez Salvador, A., García Lorenzo, R., Espín Sánchez, D. and Conesa García, C. (2022). Rainfall-runoff relationships at event scale in western Mediterranean ephemeral streams. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 26, 1243-1260. <https://hess.copernicus.org/articles/26/1243/2022/>
- Serrano, F. y Guerra, A. (2004). *Geología de la provincia de Málaga*. Málaga: Ed. CEDMA.
- Serrano, M. J. (23 de marzo de 2022). Lluvias en Málaga: El alcalde de Estepona pide “precaución” en zonas cercanas a ríos. *Málaga Hoy*. https://www.malahoy.es/estepona/alcalde-Estepona-llamamiento-precaucion-rios_0_1667833912.html
- Shakesby, R.A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105: 71-100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.001>
- Témez, J.R. (1991): Extended and improved Rational Method. Version of the Highways Administration of Spain. Proc. XXIV Congress, vol A, p 33-40.

USSCS (1972): *National Engineering Handbook*. Sec 4, sup. A, Hydrology. Soil Conservation Service.

Vallejo, R.; Serrasolses, J.; Alloza, J. A.; Baeza, M.; Bladé, C.; Chirino, E.; Duguy, B.; Fuentes, D.; Pausas, J.G.; Valdecantos, A.; Vilagrosa, A. (2009). Long-term restoration strategies and techniques, en Cerdà, A. y Robichaud, P. R., (coord.). *Fire effects on Soils and Restoration Strategies*, Enfield: Edit. Science Publishers, 373-398.

NOTAS AL PIE

- 1 Desde 2007 existe un creciente movimiento vecinal y de asociaciones ecologistas para declarar esta sierra Parque Nacional (Domínguez Reguero, 2021).
- 2 Casares, Estepona, Faraján, Genalguacil, Jubrique y Júzcar
- 3 En el estudio hidráulico solo se han modelizado 10 de estas tuberías, por aparecer una de ellas completamente cegada con rocas y tierra.
- 4 Estos límites son los siguientes: "En ningún caso se utilizarán valores del umbral de escorrentía ya corregidos superiores a 25 mm" y "para un periodo de retorno de 500 años, en ningún caso se utilizarán valores del coeficiente de escorrentía inferiores a 0,65 mm".

LISTADO DE ACRÓNIMOS

MedECC - *Mediterranean Experts on Climate and environmental Change*

NIR - infrarrojo cercano

PGRI - Plan de Gestión del Riesgo de Inundación

SIOSE - Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España

SWIR - infrarrojo de onda corta

RELACIÓN DE LAS TABLAS, FIGURAS, MAPAS Y ARCHIVOS MULTIMEDIA, INCLUYENDO SU NUMERACIÓN, TÍTULO Y PIE.

FIGURA 1. Incendios históricos (desde 1975) coincidentes en superficie con el incendio de 2021. Fuente: Dirección general del medio natural. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (2022)

FIGURA 2. Localización área de estudio. Elaboración propia

FIGURA 3. Cuencas fluviales analizadas mediante estudio hidrológico-hidráulico. Elaboración propia

FIGURA 4. Cartografía de elaboración de la media anual de la máxima precipitación diaria en la zona de trabajo. Elaboración propia

FIGURA 5. Municipios afectados por el incendio. Elaboración propia

FIGURA 6. Resultados cartográficos espaciales de la capacidad de infiltración en los escenarios pre y post-incendio. Elaboración propia

FIGURA 7. Comparativa de las láminas de inundación en escenarios pre y post-incendio para los ríos Padrón (izda.), Almarchal (centro) y Castor (dcha.). Elaboración propia

FIGURA 8. Comparativa de las láminas de inundación y ráster de calado en el cruce del río Almarchal con la carretera MA-8302. Elaboración propia

FIGURA 9. Comparativa de los ráster de inundación y calado antes y después del incendio, en las desembocaduras del arroyo del Padrón (izda.) y del río Castor (dcha.). Elaboración propia

TABLA 1. Resultados estadísticos del umbral de escorrentía medio antes y después del incendio. Elaboración propia

TABLA 2. Resultados estadísticos de la escorrentía neta y escorrentía total que cabe esperar para un evento tormentoso equivalente a la media anual de la máxima lluvia diaria. Elaboración propia

TABLA 3. Análisis hidrológico diacrónico en las cuencas de estudio. Elaboración propia

TABLA 4. Análisis hidráulico diacrónico en las cuencas de estudio: valor medio de las secciones transversales de control. Elaboración propia