

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS URBANAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIONES EN EL BARRANCO DE SANTOS (SANTA CRUZ DE TENERIFE)

Nerea MARTÍN RAYA¹, Abel LÓPEZ DÍEZ¹, Jaime DÍAZ PACHECO¹, Pedro DORTA ANTEQUERA¹ y Jordan CORREA GONZÁLEZ¹

¹*Cátedra Universitaria "Reducción del Riesgo de Desastres y Ciudades Resilientes". Universidad de La Laguna*

nmartinr@ull.edu.es, alopezd@ull.edu.es, jdiazpac@ull.edu.es,
pdorta@ull.edu.es, jcorreag@ull.edu.es

RESUMEN

Las inundaciones son la amenaza de origen natural que mayores pérdidas causan anualmente en el mundo. La expansión de las ciudades y el crecimiento de la población urbana han hecho que estos espacios sean los más amenazados, principalmente, debido a la mala planificación, la ocupación de la red de drenaje y el sellado del suelo. Dentro de esta línea, este estudio se centra en analizar los problemas de inundación en la cuenca baja del Barranco de Santos en la ciudad de Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias), una sección especialmente susceptible a sufrir inundaciones repentinas debido a los patrones de precipitación extrema típicos del régimen mediterráneo. Además, el aumento de lluvias torrenciales a consecuencia del cambio climático y la creciente irregularidad en las precipitaciones pueden estar agravando considerablemente el problema. En este trabajo, se ha desarrollado un mapa de peligro de inundación combinando el uso de modelos hidráulicos tradicionales, cuyo caudal máximo arroja 480 m³/s (T=500 años), con un inventario de puntos de daño registrados en eventos históricos. Los resultados demuestran que, para comprender e identificar las zonas propensas a sufrir inundaciones en este tipo de áreas altamente urbanizadas y de pendiente topográfica acusada, deben explorarse causas que tienen mayor relación con el drenaje urbano que con el desbordamiento de los cauces.

Palabras clave: susceptibilidad de inundación, modelización hidráulica, precipitaciones extremas, caudal máximo.

ABSTRACT

Floods are the natural hazard that causes the greatest losses worldwide each year. The expansion of cities and the growth of urban populations have made urban areas the most threatened, primarily due to poor planning, occupation of drainage networks, and soil sealing. In this context, this study focuses on analyzing flood-related problems in the lower basin of the Barranco de Santos in the city of Santa Cruz de Tenerife (Canary Islands), a section particularly susceptible to flash floods due to the extreme precipitation patterns typical of Mediterranean regimes. Moreover, the increase in torrential rains as a consequence of climate change and the growing irregularity in rainfall may be significantly worsening the issue. In this work, a flood hazard map was developed by combining traditional hydraulic models, which estimate

a maximum flow of 480 m³/s (T=500 years), with an inventory of damage points recorded during historical events. The results show that, in order to understand and identify flood-prone areas in highly urbanized regions with steep topographic slopes, causes related to urban drainage systems should be explored, rather than just focusing on river overflow.

Key words: flood susceptibility, hydraulic modeling, extreme precipitation, peak flow discharge

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones repentinas (*flash floods*), a escala mundial, son consideradas las amenazas naturales más frecuentes y devastadoras con numerosas víctimas y graves pérdidas económicas (Bui *et al.*, 2019; Pham *et al.*, 2020). Además, este tipo de inundaciones son propias de ambientes áridos o semiáridos de espacios costeros, con sistemas montañosos próximos, donde discurren cuencas de reducidas dimensiones y los cauces se encuentran secos la mayor parte del año, como, por ejemplo, el caso de la costa mediterránea (Alipour *et al.*, 2020)

Las inundaciones, así como otros fenómenos hidrometeorológicos, que con un alto nivel de confianza seguirán aumentando en intensidad y magnitud en el actual contexto de cambio climático (IPCC, 2021), unido al aumento de la exposición en áreas de alta susceptibilidad y peligrosidad han generado una creciente preocupación e interés en analizar las causas que pueden estar incrementando el riesgo frente a este tipo de amenazas (Maranzoni *et al.*, 2023). El aumento de la población urbana y la expansión de las ciudades hacen que, cada día, miles de personas sean cada vez más vulnerables a este peligro, sobre todo, debido al aumento de la impermeabilidad del suelo y la disminución de la infiltración. En este sentido, si bien para el análisis del riesgo de inundación, es muy importante la estimación del peligro, en términos de intensidad y magnitud espaciotemporal de los *drivers* (lluvias intensas, tormentas, deshielo, etc), también deben ser analizadas las causas que están generando las inundaciones en la ciudad. En numerosas ocasiones dichas causas están relacionadas con el desarrollo del tejido urbano y la existencia de un drenaje mal dimensionado, o por lo menos, que no fue planificado ponderando los extremos pluviométricos.

En ese contexto, este trabajo analiza las causas que intervienen en el riesgo de inundación en la cuenca más importante de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias), el barranco de Santos. Una cuenca urbana donde, recurrentemente, se producen importantes pérdidas económicas, e incluso humanas, debido a episodios de inundaciones relámpago (Marzol, 2002). El presente trabajo analiza la susceptibilidad de inundación combinando el uso de un modelo tradicional de análisis hidráulico del comportamiento de los caudales en las cuencas, con otros métodos basados en el histórico de impactos locales.

2. ÁREA DE ESTUDIO

En términos generales, el régimen pluviométrico del archipiélago canario se asemeja a los patrones del mundo mediterráneo, caracterizándose por una estacionalidad

marcada con los máximos de precipitación concentrados en los meses más fríos, seguidos de una marcada sequía estival. En general las precipitaciones son escasas, irregulares y con alta intensidad horaria. Los coeficientes de variación son los más altos de toda España, y el índice de concentración diario supera el 0.63 (Máyer y Marzol, 2017). En el caso de Santa Cruz de Tenerife, la media anual de lluvia en la ciudad apenas alcanza los 230 mm. El coeficiente de variación se sitúa en torno al 40%, de manera que se alternan años muy secos con otros muy lluviosos, siendo habitual la ocurrencia ocasional de episodios de torrencialidad de la lluvia. Estos últimos son los que desencadenan eventos de inundación que han causado importantes daños humanos y materiales.

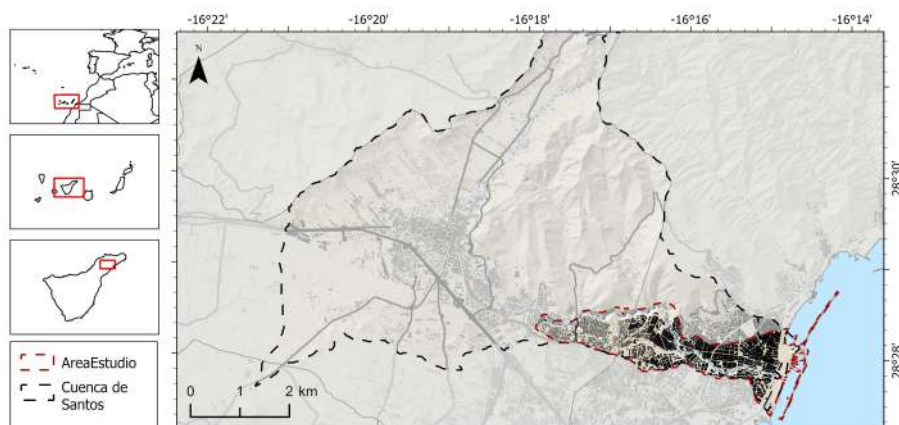


Fig. 1. Localización del área de estudio

Situada en el municipio de Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias), la cuenca del barranco de Santos abarca 42 km² y discurre por una rampa de pendiente moderada conformada por la acumulación de materiales volcánicos (Fig. 1). En ella se encuentran dos de las ocho Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI) establecidas por el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO, 2024) para la demarcación hidrográfica de Tenerife. En las últimas décadas, la ciudad de Santa Cruz de Tenerife ha sufrido varios episodios de inundación especialmente graves y ha sido afectada de manera directa por el evento de precipitación más importante, registrado el 31 de marzo de 2002. En estos eventos, los impactos de inundación en torno a la cuenca baja del Barranco de Santos donde se sitúa el centro histórico de la ciudad fueron importantes. Las lluvias de este día constituyen el episodio de mayor intensidad horaria (160 mm/h) y volumen de precipitación (232,6 mm) de la serie. Durante el evento se produjeron importantes daños, 8 víctimas y las pérdidas estimadas en 218 Mill € (López *et al.*, 2018).

2. MÉTODOS

En esta investigación se delimitan las áreas de mayor susceptibilidad de inundación empleando una metodología cuantitativa que combina el uso de métodos deductivos

para la modelización hidráulica, el cálculo de periodos de retorno y estimación del caudal, con otros métodos de carácter inductivo basado en la observación de eventos de inundación (registro histórico de incidentes).

2.1. Modelización hidráulica basada en extremos de precipitación y caudal

La modelización hidráulica, como método para el análisis del riesgo de inundación, es ampliamente utilizada a nivel global (Teng et al., 2017). Habitualmente se presenta como una metodología secuencial. En primer lugar, se calculan los periodos de retorno y sus respectivas curvas IDF con los datos diezminutales registrados entre 1996 y 2022 en la estación de la AEMET de Santa Cruz de Tenerife (C449C), utilizando la fórmula de Gumbel III ($T = 500$). Por otro lado, para el cálculo de caudales se utiliza el método del hidrograma unitario propuesto por el Soil Conservation System (SCS) (Shatnawi and Ibrahim, 2022). En este caso, como tormenta de diseño, se ha considerado un evento de 2 horas de duración en un periodo de retorno de 500 años ($T500$) a través de la metodología de los bloques alternos (Pratama et al., 2021). Además, se obtiene el coeficiente de Manning y el número de curva, a partir del umbral de escorrentía (MITECO, 2011) y el tiempo de retraso que se calcula con la siguiente fórmula: (Shatnawi and Ibrahim, 2022).

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{1900 S^{0.5}}$$

Donde L es la longitud del cauce principal y S , la pendiente media de la cuenca.

La transformación lluvia-escorrentía y el correspondiente cálculo del caudal máximo ($Q500$) se realiza utilizando HEC-HMS. Finalmente, se realiza la modelización de zonas inundables con el software HEC-RAS, que ha sido utilizado a escala mundial en numerosos casos de estudio (Knelb et al., 2005; Khattak et al., 2016; Ogras and Onel, 2020, entre otros)

2.2. Identificación de incidentes registrados en episodios históricos

Entre los métodos inductivos para analizar el peligro de inundación en entornos urbanos se encuentra la identificación de áreas de impacto constatado (Cherqui et al., 2015). Para cubrir este objetivo, y cumplimentar las zonas susceptibles obtenidas por la modelización hidráulica, se ha empleado un inventario de puntos de incidentes de daño producidos por impactos de eventos de inundación en el estudio de riesgos del Plan General de Ordenación de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife (Ayuntamiento Santa Cruz de Tenerife, 2005). Para esta investigación se realiza un proceso de digitalización de los puntos a un SIG trasladando la clasificación de los impactos según se encuentra recogida en el PGO: (1) falta o insuficiente capacidad de drenaje, (2) incorporación de acarreos, (3) obstrucción de la red de drenaje y (4) peligro de desbordamiento. Con estas categorías se ha realizado un análisis básico estadístico-descriptivo.

2.3. Generación de la cartografía de susceptibilidad

En primer lugar, se realiza un análisis kernel de los incidentes identificados para establecer una zonificación de esta variable (Zhang et al., 2023). Posteriormente, a este resultado se le practica un producto con la capa que contiene los valores de las zonas inundables. El resultado se homogeneiza utilizando el método de rupturas naturales (Rahadiano *et al.*, 2015) tal y como se suele hacer para establecer diferentes niveles de amenaza en los análisis orientados a evaluar el riesgo (Iglesias et al., 2021).

1. RESULTADOS

Analizando los periodos de retorno calculados, la máxima precipitación esperada en 500 años es de 43,21 mm en 10 minutos y 258,33 mm en 12 horas. Al aplicar estos datos para obtener el hietograma de tormenta se observa cómo, con un total de 212,8 mm, el máximo de precipitación se alcanza durante la primera hora (62,02 mm). Por su parte, el caudal máximo de avenida se estima en 483,9 m³/s, y se produce a las dos horas de comenzar la tormenta, debido al tiempo de concentración de la cuenca (*Fig. 2*). Datos similares se registran en cuencas mediterráneas con cauces efímeros (Rinat et al., 2018; Benito et al., 2020).

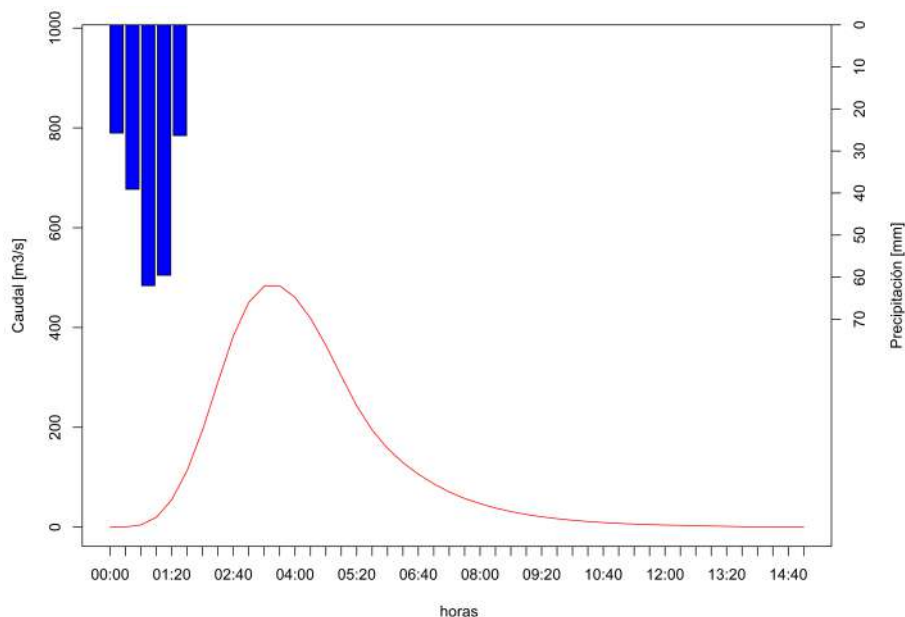


Fig. 2. Hietograma e hidrograma del Barranco de Santos ($T=500$)

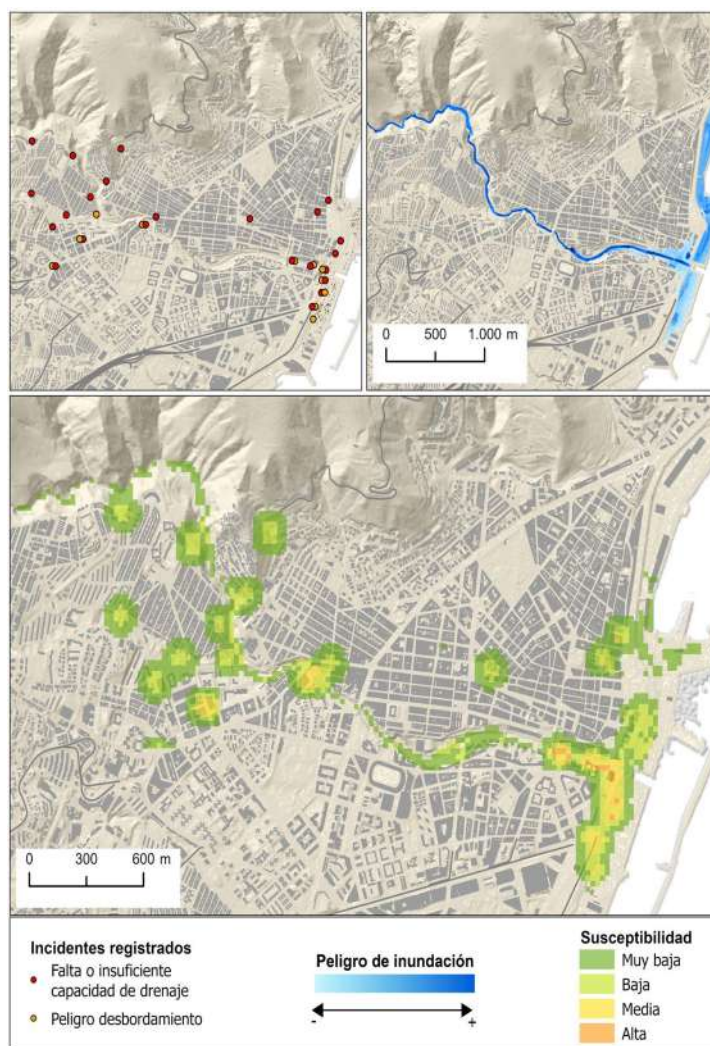


Fig. 3. Susceptibilidad de inundación en el Barranco de Santos

La modelización de las láminas de inundación cubre un total de 15,15 ha, correspondiendo con el 2,9% del área total de la cuenca. La mayor peligrosidad se encuentra en la desembocadura, donde la lámina de agua se expande más allá del lecho del cauce.

La ciudad registra un total de 34 incidentes en la superficie urbana analizada en el entorno de la cuenca del Barranco de Santos. La mayoría de estos se corresponden con falta o insuficiente capacidad de drenaje (67,7%), mientras que un 32,5% con peligro de desbordamiento. Cabe destacar que, de todos estos puntos, solo el 47% (16 puntos) se localizan en zonas inundables. El resto se encuentran diseminados a lo largo

de la cuenca demostrando un claro problema con el drenaje urbano y el sellado del suelo.

En este sentido, la integración de las dos metodologías muestra como las zonas con mayor susceptibilidad se sitúan en la desembocadura y en algunos sectores aislados y separados ligeramente del cauce principal. Incorporando ambos análisis, el territorio analizado susceptible de sufrir algún evento de inundación se encuentra en torno al 11%, donde un 1,2% corresponde con peligro moderado-alto y un 10,1% posee una peligrosidad baja. En el 88,6% del área analizada restante, el peligro por inundación es prácticamente inexistente (Fig. 3)

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En zonas urbanas con climas semiáridos, donde el crecimiento ha sido muy rápido, y sin planificación territorial, es habitual que los cauces de los barrancos, normalmente secos, sean ocupados (Pino and Hormazábal, 2016). Por ello, inventariar y analizar puntos problemáticos relacionados con las inundaciones relámpago es una cuestión que ha sido abordada en numerosas ocasiones (Marlow et al., 2011; López-Díez et al., 2019). La falta o insuficiente capacidad de drenaje debido a la construcción insuficiente de obras de desagüe para el caudal máximo de avenida es una de las cualidades señaladas para este tipo de ciudades (Hassan et al., 2022) y así se pone de manifiesto en el caso del barranco de Santos.

Del mismo modo, los caudales máximos obtenidos son equiparables a los registrados en ambientes mediterráneos (Estrany et al., 2010), donde las precipitaciones de alta intensidad horaria generan importantes inundaciones. Si se comparan los resultados con el mayor evento de precipitación acontecido en Tenerife (31 de marzo de 2002) vemos que poseen una alta similitud. En apenas dos horas y media cayeron 232 mm y dentro de los primeros 120 minutos de la tormenta ya se habían registrado 188,4 mm mientras que la tormenta simulada en este trabajo recoge 212 mm.

Por otro lado, actualmente, existen multitud de trabajos orientados al mapeo y análisis de zonas inundables mediante la modelización espacial de su expansión, calado e, incluso en algunos casos, velocidad en función de los diferentes periodos de retorno (Anni et al., 2020). Sin embargo, para comprender e identificar las zonas propensas a ser afectadas por *flash floods*, especialmente en áreas altamente urbanizadas, se hace necesario combinar metodologías deductivas capaces de modelizar el comportamiento de los cauces, con otros métodos de observación empírica, que permiten identificar áreas de peligro vinculadas al drenaje urbano y a la precipitación *in situ*. Por ello, la realización de un mapa de susceptibilidad de inundación de detalle que integre ambas variables analizadas en este trabajo puede mejorar el análisis de peligrosidad de la ciudad.

Por último, es importante señalar que en el actual contexto de cambio climático pueden acontecer episodios de lluvia extrema que podrían modificar el nivel de peligrosidad y riesgo de las inundaciones. Por ello, es necesario que en futuros estudios se puedan integrar las proyecciones climáticas de precipitación que permitan definir mejor los caudales máximos de avenida de cara al diseño de infraestructuras de drenaje eficientes y a tomar las acciones de reducción del riesgo de desastres de inundación pertinentes. Además, este trabajo deja abierta la posibilidad de desarrollar

nuevas investigaciones que incorporen datos relacionados con la vulnerabilidad y exposición, para obtener una visión integral y pormenorizada del riesgo de la zona analizada.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades bajo el proyecto “Herramientas para la prevención y gestión de los impactos sociales de inundaciones en áreas litorales”, con referencia PID2021-122500OB-I00. Los autores Nerea Martín Raya y Jordan Correa González se encuentran disfrutando de un contrato predoctoral FPU financiado por el Ministerio de Universidades.

REFERENCIAS

- Alipour, A., Ahmadi Alipour, A., & Moradkhani, H. (2020). Assessing flash flood hazard and damages in the southeast United States. *Journal of Flood Risk Management*, 13(2), e12605. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12605>
- Anni, A. H., Cohen, S., & Praskiewicz, S. (2020). Sensitivity of urban flood simulations to stormwater infrastructure and soil infiltration. *Journal of Hydrology*, 588, 125028. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125028>
- Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife (2005) PGO. Plan General de Ordenación de Santa Cruz de Tenerife. Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife. Available at: <https://www.urbanismosantacruz.es/sites/default/files/Planeamiento/AB-PGOU92/BOC29-06>
- Benito G, Sanchez-Moya Y, Medialdea A, Barriandos M, Calle M, Rico M, *et al.* (2020) Extreme floods in small mediterranean catchments: long-term response to climate variability and change. *Water*; 12(4):1008. <https://doi.org/10.3390/w12041008>
- Bui, D. T., Tsangaratos, P., Ngo, P. T. T., Pham, T. D., & Pham, B. T. (2019). Flash flood susceptibility modeling using an optimized fuzzy rule-based feature selection technique and tree-based ensemble methods. *Science of the total environment*, 668, 1038-1054. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.422>
- Cherqui, F., Belmeziti, A., Granger, D., Sourdril, A., & Le Gauffre, P. (2015). Assessing urban potential flooding risk and identifying effective risk-reduction measures. *Science of the Total Environment*, 514, 418-425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.027>
- Estrany, J., Garcia, C., & Alberich, R. (2010). Streamflow dynamics in a Mediterranean temporary river. *Hydrological sciences journal*, 55(5), 717-736. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.493740>
- Hassan BT, Yassine M, Amin D. (2022) Comparison of urbanization, climate change, and drainage design impacts on urban flashfloods in an arid region: case study, New Cairo, Egypt. *Water*; 14(15):2430. <https://doi.org/10.3390/w14152430>
- Iglesias, V., Braswell, A. E., Rossi, M. W., Joseph, M. B., McShane, C., Cattau, M., ... & Travis, W. R. (2021). Risky development: Increasing exposure to natural hazards

- in the United States. *Earth's future*, 9(7), e2020EF001795. <https://doi.org/10.1029/2020EF001795>
- IPCC (2021). *Cambio Climático 2021: Un resumen para todo el mundo*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_SummaryForAll_Spanish.pdf
- Khattak, M. S., Anwar, F., Saeed, T. U., Sharif, M., Sheraz, K., & Ahmed, A. (2016). Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcGIS: a case study of Kabul River. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 1375-1390.
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4), 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024>
- López Díez, A., Dorta, P., Díaz Pacheco, J., & Caraballo Acosta, O. (2018). Consecuencias de los eventos meteorológicos de rango extraordinario en Canarias: temporales de viento, inundaciones y fenómenos costeros (1996-2016). *XI Congreso de la Asociación Española de Climatología* <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9953>
- López Díez, A., Máyer Suárez, P., Díaz Pacheco, J., & Dorta Antequera, P. (2019). Rainfall and flooding in coastal tourist areas of the Canary Islands (Spain). *Atmosphere*, 10(12), 809. <https://doi.org/10.3390/atmos10120809>
- Maranzoni, A., D'Oria, M., & Rizzo, C. (2023). Quantitative flood hazard assessment methods: A review. *Journal of Flood Risk Management*, 16(1), e12855. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12855>
- Marlow D, Pearson L, MacDonald DH, Whitten S, Burn S. (2011) A framework for considering externalities in urban water asset management. *Water Sci. Technol.*;64(11):2199–206
- Marzol Jaén, M. V. (2002). Lluvias e inundaciones en la ciudad de Santa Cruz de Tenerife. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 3.
- Máyer, P., Marzol, M. W., & Parreño Castellano, J. M. (2017). Precipitation trends and a daily precipitation concentration index for the mid-eastern Atlantic (Canary Islands, Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica*. <https://doi.org/10.18172/cig.3095>
- Ministerio de transición ecológica (2024). Áreas con riesgo potencial significativo de inundación. *Cartografía digital*. Disponible at: <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/arpsi.html>
- Ministerio para la Transición Ecológica, MITECO (2011). *Guía Metodológica Para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*, 1st ed.; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino: Madrid, Spain, pp. 19–52.
- Ogras, S., & Onen, F. (2020). Flood analysis with HEC-RAS: a case study of Tigris River. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2020/6131982>
- Pham, B. T., Avand, M., Janizadeh, S., Phong, T. V., Al-Ansari, N., Ho, L. S., Das, S., Le, H. V., Amini, A., Bozchaloei, S. K., Jafari, F., & Prakash, I. (2020). GIS Based Hybrid Computational Approaches for Flash Flood Susceptibility Assessment. *Water*, 12(3), 683. <https://doi.org/10.3390/w12030683>

- Pino A, Hormazábal N. (2016) Informal settlements: Reinterpreting rural imaginary in urban areas: The case of Valparaíso's ravines. *Habitat Int*; 53:534–45. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.12.014>.
- Pratama, M. I., Rohmat, F. I. W., Farid, M., Adityawan, M. B., Kuntoro, A. A., & Moe, I. R. (2021, April). Flood hydrograph simulation to estimate peak discharge in Ciliwung river basin. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 708, No. 1, p. 012028). IOP Publishing. 10.1088/1755-1315/708/1/012028
- Rahadiano, H., Fariza, A., & Hasim, J. A. N. (2015). Risk-level assessment system on Bengawan Solo River basin flood prone areas using analytic hierarchy process and natural breaks: Study case: East Java. In *2015 international conference on data and software engineering (ICoDSE)* (pp. 195-200). IEEE. 10.1109/ICODSE.2015.7436997
- Rinat Y, Marra F, Zoccatelli D, Morin E. (2018) Controls of flash flood peak discharge in Mediterranean basins and the special role of runoff-contributing areas. *J Hydrol*; 565:846–60. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.055>
- Shatnawi, A., & Ibrahim, M. (2022). Derivation of flood hydrographs using SCS synthetic unit hydrograph technique for Housha catchment area. *Water Supply*, 22(5), 4888-4901.
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S. J. E. M. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental modelling & software*, 90, 201-216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>
- Zhang H, Jia H, Liu W, Wang J, Xu D, Li S, *et al.* (2023) Spatiotemporal information mining for emergency response of urban flood based on social media and remote sensing data. *Remote Sens (Basel)*; 15(17):4301. <https://doi.org/10.3390/rs15174301>