



INUNDACIONES Y SEQUÍAS

Análisis Multidisciplinar para Mitigar
el Impacto de los Fenómenos
Climáticos Extremos.

Joaquín Melgarejo Moreno
M^a Inmaculada López Ortiz
Patricia Fernández Aracil

(Editores)

INUNDACIONES Y SEQUÍAS

Análisis Multidisciplinar para Mitigar
el Impacto de los Fenómenos
Climáticos Extremos.

Joaquín Melgarejo Moreno
M^a Inmaculada López Ortiz
Patricia Fernández Aracil

(Editores)

© los autores, 2021
© de esta edición: Universitat d'Alacant

ISBN: 978-84-1302-138-6

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| BLOQUE I - PLANIFICACIÓN | 13 |
| PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN. ANTECEDENTES HISTÓRICOS, <i>Francisco Roselló Vilarroig</i> | 15 |
| EL PLAN VEGA RENHACE: UNA OPORTUNIDAD ESTRATÉGICA PARA LA ADAPTACIÓN DE UN TERRITORIO A LOS EXTREMOS DEL AGUA, <i>Jorge Olcina Cantos</i> | 33 |
| BALANCE HÍDRICO ACTUAL Y FUTURO EN LAS CUENCAS EN ESPAÑA, RETOS Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN, <i>Manuel Pulido Velázquez, Héctor Macián Sorribes y Alvar Escriva-Bou</i> | 55 |
| GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA: CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN, PERCEPCIÓN SOCIAL Y OPINIÓN PÚBLICA, <i>Pilar Paneque y Jesús Vargas Molina</i> | 77 |
| ORDENACIÓN DEL TERRITORIO Y ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD PARA LA PREVENCIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN, <i>Jesús Vargas Molina y Fulgencio Cánovas-García</i> | 101 |
| FENÓMENOS INESTABLES DE ORIGEN TROPICAL EN EL ATLÁNTICO NORTE SURORIENTAL <i>Pedro Dorta Antequera, Jaime Díaz Pacheco y Abel López Díez</i> | 127 |
| LOS PLANES DE EMERGENCIA ANTE SITUACIONES DE SEQUÍA EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO URBANO LITORALES DEL SURESTE PENINSULAR, <i>Rubén Villar-Navascués, Sandra Ricart y María Hernández-Hernández</i> | 147 |
| MAPA DE MÁXIMAS LLUVIAS DIARIAS EN LA PROVINCIA DE ALICANTE, <i>Javier Valdés Abellán, Mauricio Ubeda Muller, Fernando Pérez Calvo y Miguel Fernández Mejuto</i> | 169 |
| EL CUMPLIMIENTO DEL ODS DE RESILIENCIA ANTE INUNDACIONES A TRAVÉS DEL PLANEAMIENTO TERRITORIAL Y URBANÍSTICO, <i>Jesús Conde Antequera</i> | 195 |
| CIUDAD DISPERSA E INUNDACIONES EN MÁLAGA (ESPAÑA). LOS ESPACIOS FLUVIALES URBANOS COMO VECTOR DE REFLEXIÓN SOBRE LA ACTIVIDAD HUMANA Y SU OCUPACIÓN DEL MEDIO NATURAL, <i>Antonio Gallegos Reina y Carmen Elisa Moral Gómez-Monedero</i> | 215 |
| INCORPORACIÓN DE CONTENIDOS SOBRE EL RIESGO DE INUNDACIÓN EN LA EDUCACIÓN VIAL, <i>Andrés Díez Herrero, Mario Hernández Ruiz, Daniel Vázquez Tarrío, Mercedes Velasco de la Rubia</i> | 225 |
| LA PROTECCIÓN CIVIL Y LA GESTIÓN DE LAS EMERGENCIAS: EXPERIENCIA DEL PLAN VEGA BAJA RENHACE (ACTUACIÓN 12), <i>Antonio Oliva Cañizares, Jorge Olcina Cantos</i> | 237 |
| IMPORTANCIA DE LA FENOLOGÍA DE LOS CULTIVOS EN LA EVALUACIÓN Y MITIGACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN: RÍO DUERO ENTRE TORO Y ZAMORA, <i>Andrés Díez Herrero, Julio Garrote Revilla, Daniel Vázquez Tarrío, Mario Hernández Ruiz</i> | 255 |
| RAMBLAS URBANAS, PERCEPCIÓN SOCIAL Y RIESGO DE INUNDACIÓN, EL CASO DE ALGUÉÑA, <i>Ricardo Abad Coloma</i> | 265 |
| UTILIZACIÓN DE DRONES AÉREOS Y ACUÁTICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA RUGOSIDAD DE CAUCES FLUVIALES, <i>Daniel Vázquez Tarrío, Mario Hernández Ruiz, Juan Carlos García López-Davalillo, Julio Garrote Revilla y Andrés Díez Herrero</i> | 277 |
| PLAN DE EMERGENCIA FRENTE A INUNDACIONES EN LOS SERVICIOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA Y SANEAMIENTO DE MOLINA DE SEGURA (MURCIA), <i>Arturo Albaladejo Ruiz</i> | 289 |
| PLANES TERRITORIALES MUNICIPALES FRENTE A EMERGENCIAS: CASO DE ESTUDIO DE COX, (ALICANTE, ESPAÑA), <i>Antonio Vicente Galvañ Vicente, Esther Sánchez Almodóvar y Javier Martí Talavera</i> | 301 |

| | |
|--|------------|
| DANA 2019, INUNDACIÓN Y OCUPACIÓN DE ESPACIOS DE RIESGO EN LA RAMBLA DE ABANILLA, Oriol Pérez Jiménez | 315 |
| INTEGRACIÓN CARTOGRÁFICA DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN LA PALMA (ISLAS CANARIAS), Abel López Díez, Jaime Díaz Pacheco, Pedro Dorta Antequera, Daniella Ghersi Da Gama y Nerea Martín Raya | 329 |
| ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS ANUALES Y EN SUS PERIODOS DE RETORNO EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA, Juan Andrés García-Valero | 343 |
| INCREMENTO ABRUPTO DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA EN LAS CABECERAS DEL RÍO SEGURA PROMOVIDO POR LA OSCILACIÓN DEL ATLÁNTICO NORTE DESDE 1980, Amar Halifa-Marín, Pedro Jiménez-Guerrero y Juan Pedro Montávez | 353 |
| CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDROLÓGICOS DE LA MICROCUENCA DEL RÍO COÑAQUE (ECUADOR), José Gerardo Becerra Carrión y Antonio Jódar Abellán | 369 |
| PROCEDIMIENTOS E INSTRUMENTOS LEGALES PARA LA DECLARACIÓN DE LA SEQUÍA EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA, José Alberto Redondo Orts, María Inmaculada López Ortiz y Miguel A. Sáez García | 383 |
| SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE UNA MICROCUENCA EN ECUADOR UTILIZANDO EL MODELO SWAT PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO, Leonardo Falcones Rodríguez, Teresa Palacios Cabrera y Antonio Jódar Abellán..... | 397 |
| BLOQUE II - MITIGACIÓN E INFRAESTRUCTURAS..... | 409 |
| LA GESTIÓN DEL REGADÍO ANTE LA ESCASEZ DEL AGUA: EL CASO DE ESPAÑA, Julio Berbel Vecino y Jaime Espinosa-Tasón..... | 411 |
| PRINCIPALES NOVEDADES DE LA REVISIÓN DE LOS PGRI. NUEVAS NECESIDADES Y PRIORIDADES DE ACTUACIÓN PARA LOS PRÓXIMOS AÑOS..... | 417 |
| Juan Francisco Arrazola Herreros, Mónica Aparicio Martín y Francisco Javier Sánchez Martínez ESTADO DE LOS TRABAJOS DE ADAPTACIÓN AL RIESGO DE INUNDACIÓN, Aránzazu Gurrea-Nozaleda Merayo | 435 |
| EJEMPLOS DE MEDIDAS DE RECUPERACIÓN AMBIENTAL Y PROTECCIÓN DE INUNDACIONES. DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA, Gonzalo Magdaleno Payán | 453 |
| CORREDORES HIDRÁULICOS VERDES Y LAGUNAS DE LAMINACIÓN EN LA VEGA BAJA DEL SEGURA, José Vicente Benadero García-Morato, Pedro Ignacio Muguruza Oxinaga y Jordi Marín Abdilla..... | 471 |
| ACESSO À ÁGUA NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO FRENTE ÀS AMEAÇAS CLIMÁTICAS, Pedro Roberto Jacobi | 493 |
| MODERNAS TÉCNICAS DE AHORRO DE AGUA PARA GESTIONAR LA ESCASEZ DE RECURSOS HÍDRICOS EN FRUTICULTURA, Pablo Melgarejo, Pilar Legua, Juan José Martínez Nicolás y Antonio Marhuenda..... | 499 |
| MEJORAS EN EL MANEJO DEL RIEGO MEDIANTE INDICADORES DE GESTIÓN PARA MITIGACIÓN DE SEQUÍAS, Ricardo Abadía, Miguel Mora, Bernat Roig-Merino, Carmen Rocamora, José María Cámara, Ricardo Suay y Herminia Puerto..... | 545 |
| LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL SUELO Y SU PAPEL EN LA MITIGACIÓN DE LAS INUNDACIONES, José Navarro Pedreño e Ignacio Gómez Lucas..... | 563 |
| LA REUTILIZACIÓN EN ESPAÑA, HERRAMIENTA PARA LA PREVENCIÓN DE LA SEQUÍA Y EL EQUILIBRIO HÍDRICO, Domingo Zarzo..... | 591 |
| CONDUCCIÓN JÚCAR - VINALOPÓ. EJEMPLO Y OPORTUNIDAD PARA LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA, Vicente José Richart Díaz | 611 |
| PLAN DE PROTECCIÓN FRENTE A INUNDACIONES Y DRENAJE SOSTENIBLE EN LA VEGA BAJA DEL SEGURA, Sergio Sánchez Ríos, Ángel Villanueva Blasco, Armando Ortuño Padilla, Jairo Casares Blanco y Paloma Calero Romero..... | 643 |

| | |
|--|-----|
| PROPUESTA DE SOLUCIÓN AL DÉFICIT HÍDRICO MEDIANTE LA DESALACIÓN SUBMARINA: DISEÑO INNOVADOR COMO PROYECTO TRACTOR DE LA ECONOMÍA, Borja Blanco y Alejandro López Navarrete | 665 |
| EL PAPEL DEL PATRIMONIO RELACIONADO CON EL AGUA EN LA RESILIENCIA FRENTE A FENÓMENOS CLIMÁTICOS EXTREMOS, Miguel Fernández Mejuto, Rebeca Palencia Rocamora, Fernando Pérez Calvo, Juan Antonio Hernández Bravo y Héctor Fernández Rodríguez..... | 683 |
| IMPLICACIONES DE LOS SUDS EN LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LA ESCORRENTÍA URBANA, Arturo Trapote Jaume | 699 |
| EL AHORRO DE PRECAUCIÓN COMO INSTRUMENTO PARA CUBRIR EL RIESGO DE SEQUÍA HIDROLÓGICA EN EL REGADÍO, José A. Gómez-Limón, M. Dolores Guerrero-Baena y José A. Fernández-Gallardo..... | 713 |
| AGUAS DEPURADAS Y PLUVIALES: RECURSOS PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA E INUNDACIÓN. EJEMPLOS Y APRENDIZAJES, Sandra Ricart, Rubén Villar-Navascués, Antonio M. Rico-Amorós, María Hernández-Hernández y Jorge Olcina-Cantos | 725 |
| LA EXPERIENCIA DEL MAYOR TRASVASE DE AGUA EN BRASIL COMO SOLUCIÓN PARA LOS EFECTOS DE LA SEQUÍA, José Irivaldo Alves Oliveira Silva..... | 737 |
| LA ADAPTACIÓN A LOS EXTREMOS ATMOSFÉRICOS Y AL CAMBIO CLIMÁTICO MEDIANTE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) Y SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA (SBN): PROPUESTA EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE CALLOSA DE SEGURA (ALICANTE, ESPAÑA), Antonio Oliva Cañizares, Esther Sánchez Almodóvar y María José Marcos Palacios | 747 |
| CONTRIBUCIÓN DE LA AGRICULTURA A LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO GLOBAL. BALANCE EN TRES COMUNIDADES DE REGANTES DEL SURESTE ESPAÑOL, Amparo Melián Navarro, Soraya Colino Jiménez y Antonio Ruiz Canales | 763 |
| REDES INTELIGENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA LA GESTIÓN DEL CICLO HÍDRICO MUNICIPAL: CASOS DE GESTIÓN EN PERIODOS DE SEQUÍA, Héctor Fernández Rodríguez, Miguel Fernández Mejuto, Fernando Pérez Calvo y Rebeca Palencia Rocamora..... | 775 |
| DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y FÍSICO-QUÍMICAS DE RESIDUOS ORGÁNICOS PARA MEJORAR LAS PROPIEDADES HÍDRICAS DEL SUELO, Teresa Rodríguez-Espinosa, José Navarro-Pedreño, Ignacio Gómez Lucas y María Belén Almendro Candel..... | 785 |
| EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS CAUDALES MÁXIMOS DE DISEÑO EN LA ESPAÑA PENINSULAR, Adrián López Ballesteros, Javier Senent Aparicio, Patricia Jimeno Sáez y Julio Pérez Sánchez..... | 799 |
| REDUCCIÓN DEL ESPACIO DE BÚSQUEDA EN LA OPTIMIZACIÓN DE REDES DE DRENAJE BASADA EN EL ANÁLISIS DE RIESGO INUNDACIÓN, Leonardo Bayas-Jiménez, Francisco Alberto Deño Nuñez, F. Javier Martínez-Solano y Pedro L. Iglesias-Rey..... | 809 |
| ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS AVENIDAS EN LA CUENCA DRENANTE AL LAGO ERKEN (SUECIA) MEDIANTE SWAT+, Inmaculada Jiménez Navarro, Javier Senent Aparicio, Patricia Jimeno Sáez y Adrián López Ballesteros..... | 821 |
| ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL RÉGIMEN DE AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RÍO LADRA MEDIANTE SWAT+, Gerardo Castellanos Osorio, Javier Senent Aparicio, Adrián López Ballesteros y Patricia Jimeno Sáez | 833 |
| MODELO PRELIMINAR DE CIRCULACIÓN DEL AGUA EN EL ARROZ. MARGEN DERECHA RÍO GUADALQUIVIR, Blanca Cuadrado-Alarcón, Sébastien Guery y Luciano Mateos | 847 |
| THE ENERGY PRODUCTION IN PHOTOVOLTAIC MODULES AND THE ENERGY CONSUMED IN THE UNIVERSITY OF ALICANTE WATER PRESSURIZED IRRIGATION NETWORK, Housseem Eddine Chabour, Miguel Angel Pardo y Adrian Riquelme | 857 |

| | |
|---|------------|
| ANÁLISIS METODOLÓGICO DE ESTIMACIÓN DE DAÑOS EN INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS. RIESGO HIDROLÓGICO. EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN, Ramón Egea Pérez, Francisco J. Navarro González, Mónica Cortés Molina y Joaquín Melgarejo Moreno | 869 |
| INFRAESTRUCTURAS DE SANEAMIENTO Y DRENAJE PARA ADAPTACIÓN A SUCESOS EXTREMOS DE SEQUÍAS E INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL CAMPO DE CARTAGENA-MAR MENOR, José María Gómez Espín, Encarnación Gil Meseguer y Miguel Borja Bernabé Crespo..... | 897 |
| BLOQUE III - EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA, AMBIENTAL Y JURÍDICA | 909 |
| EL SISTEMA ESPAÑOL DE SEGUROS AGRARIOS COMBINADOS ANTE LOS RIESGOS DE SEQUÍA E INUNDACIÓN, Miguel Pérez Cimas, M ^a Carmen Sánchez Morillo-Velarde, Silvia Isabel Crespo Vergara, Gema López Orozco y Almudena Pachá Guerras | 911 |
| INSTRUMENTOS ECONÓMICOS PARA AFRONTAR LAS SITUACIONES DE ESCASEZ HÍDRICA, Joaquín Melgarejo Moreno, Marcos García López y Borja Montano | 937 |
| LA CONTRIBUCIÓN DE LAS ENTIDADES LOCALES AL PRINCIPIO DE SEGURIDAD HÍDRICA EN LA GESTIÓN DE LAS SEQUÍAS: LOS PLANES DE EMERGENCIA, Estanislao Arana García | 961 |
| ¿CUMPLE EL PLANEAMIENTO URBANÍSTICO LA NORMATIVA ESPAÑOLA SOBRE PREVENCIÓN DE RIESGOS NATURALES?, Jesús Garrido Manrique..... | 977 |
| MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA COMPARTIDAS ENTRE DIFERENTES ÁMBITOS DE PLANIFICACIÓN: SINGULARIDAD ADMINISTRATIVA O ENTIDAD HÍDRICA CON CONTINUIDAD HIDROGEOLÓGICA. APLICACIÓN EN LA DIVISORIA JÚCAR-SEGURA, José Manuel Murillo Díaz..... | 997 |
| MEDIOS DE COMUNICACIÓN: EL CAMPO DE BATALLA DE LA GUERRA DEL AGUA, Fermín Crespo Rodríguez y Arturo Jiménez Rodríguez..... | 1023 |
| EL TRASVASE TAJO-SEGURA, INFRAESTRUCTURA DE CORRECCIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO AGRARIO EN EL SURESTE DE ESPAÑA, Patricia Fernández Aracil y Joaquín Melgarejo Moreno | 1047 |
| LA PARTICIPACIÓN PÚBLICA EN LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA FRENTE A SEQUÍAS E INUNDACIONES, Miguel Ángel Blanes Climent..... | 1073 |
| HERRAMIENTAS SOCIALES PARA UNA GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE INUNDACIÓN, Guadalupe Ortiz, Pablo Aznar-Crespo y Antonio Aledo..... | 1095 |
| INSTRUMENTOS JURÍDICOS PARA LA REGULACIÓN DE LA SEQUÍA, Andrés Molina Giménez..... | 1115 |
| ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS SEQUÍAS SOBRE LOS CULTIVOS. REGIÓN DE MURCIA, Alberto del Villar García..... | 1139 |
| EL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DE LA ESCASEZ Y LA ALTERNATIVA DEL AUTOCONSUMO MEDIANTE PANELES FOTOVOLTAICOS, Marcos García-López, Borja Montano y Joaquín Melgarejo | 1159 |
| EVALUACIÓN EX-POST DEL IMPACTO ECONÓMICO DE LA SEQUÍA HIDROLÓGICA EN LA AGRICULTURA ANDALUZA 2005-2008, Jaime Espinosa-Tasón y Julio Berbel | 1169 |
| LA IMPORTANCIA DEL FACTOR EDUCACIÓN PARA MITIGAR LOS RIESGOS ATMOSFÉRICOS. UN ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES SOBRE LA SEQUÍA QUE SE INSERTAN EN LOS LIBROS DE TEXTO DE CIENCIAS SOCIALES, (EDUCACIÓN PRIMARIA), Álvaro-Francisco Morote Seguido..... | 1183 |
| LA FORMACIÓN DEL PROFESORADO SOBRE EL RIESGO DE INUNDACIÓN. LA IMPORTANCIA DEL FACTOR EDUCACIÓN COMO MEDIDA DE MITIGACIÓN, Álvaro-Francisco Morote Seguido y María Hernández Hernández..... | 1195 |
| LA RENTABILIDAD DEL AGUA Y LAS TARIFAS DE CONDUCCIÓN DE AGUAS DEL TRASVASE TAJO-SEGURA, Marcos García-López, Borja Montano y Joaquín Melgarejo | 1207 |

| | |
|---|------|
| A STUDY OF JUDICIAL REMEDIES FOR WATER RIGHTS DISPUTES IN EARLY TWENTIETH CENTURY IN CHINA, Yang Yang y Yu Pin Ai | 1229 |
| LOS HUMEDALES Y SU EFICACIA PARA EL CORRECTO CONTROL DE AVENIDAS Y PREVENCIÓN DE INUNDACIONES: EVOLUCIÓN JURÍDICO-AMBIENTAL EN EL MARCO TERRITORIAL VALENCIANO, Francisco José Abellán Contreras | 1243 |
| ACTITUDES HACIA LAS MEDIDAS DE GESTIÓN DE LAS INUNDACIONES EN ZAMORA: UNA ESTRATEGIA METODOLÓGICA PARA SU MEDICIÓN Y CAMBIO, Fernando Talayero Sebastián, Juan Antonio García Martín, Raquel Pérez-López, Andrés Díez-Herrero, José María Bodoque del Pozo, Lucía Poggio Lagares y María Amérigo Cuervo-Arango | 1255 |
| EL ESTADO DE EXCEPCIÓN FRENTE A FENÓMENOS DE SEQUÍAS E INUNDACIONES EN ECUADOR, Andrés Martínez Moscoso e Israel Castro Enríquez..... | 1267 |
| LA UTILIZACIÓN DE LA EDUCACIÓN Y SENSIBILIZACIÓN AMBIENTAL EN ESCOLARES COMO ELEMENTO CLAVE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO: UN CASO PRÁCTICO, Juan Carlos García Prieto, Manuel García Roig, Diana Málaga Martín, María Mercedes Ramos Rodríguez, Alicia Gutiérrez del Valle, Francisco Javier Burguillo Muñoz, Felipe José Bello Estévez, Maite del Arco Aláinez, Rebeca Martín Castilla y Juan Carlos Rico Jiménez | 1279 |
| EXPLORANDO EL IMPACTO ECONÓMICO DE LA FERTILIZACIÓN CARBÓNICA EN LOS INVERNADEROS, DE ALMERÍA, Blanca Cuadrado-Alarcón, Javier Martínez-Dalmau, Alfonso Expósito y Julio Berbel | 1294 |
| TECNOLOGÍAS PARA EL APRENDIZAJE Y EL CONOCIMIENTO DEL PATRIMONIO HIDRÁULICO EN LA VEGA BAJA DEL RÍO SEGURA, María Francisca Zaragoza Martí, José Manuel Mira Martínez y Alfredo Ramón Morte..... | 1305 |
| ANÁLISIS DEL ESTADO Y CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN LA COMUNIDAD VALENCIANA (ESPAÑA), Antonio Jódar Abellán, Daniel Prats Rico, Miguel Ángel Pardo Picazo, Irene Sentana Gadea y Jesús Rodrigo-Comino | 1321 |
| SISTEMA DE DOS NIVELES PARA UNA COBERTURA ÓPTIMA DEL RIESGO DE INUNDACIÓN, Joaquín Torres y Sonia Sanabria | 1333 |

ANÁLISIS METODOLÓGICO DE ESTIMACIÓN DE DAÑOS EN INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS. RIESGO HIDROLÓGICO. EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN

Ramón Egea Pérez

Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia S.A. (EMUASA), España
ramon.egea@emuasa.es
<https://orcid.org/0000-0003-0194-7290>

Francisco J. Navarro González

Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Alicante, España
francisco.navarro@ua.es
<https://orcid.org/0000-0001-8164-1931>

Mónica Cortés Molina

Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Alicante, España
monica.cortes@ua.es
<https://orcid.org/0000-0001-5780-7057>

Joaquín Melgarejo Moreno

Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales (IUACA),
Universidad de Alicante, España
jmelgar@ua.es
<https://orcid.org/0000-0002-9752-2854>

RESUMEN

Llamamos infraestructuras críticas a aquellas que resultan esenciales. Para este tipo de infraestructuras se hace necesaria la implantación de metodologías analíticas que permitan de manera rápida la obtención de la susceptibilidad o la resiliencia como de los posibles daños generados en la misma con ocasión de episodios extremos de precipitación, mediante una perspectiva holística en la que intervienen los factores vinculados al riesgo hidrológico. En particular, se analizan las infraestructuras hidráulicas urbanas considerando el grado de criticidad, definido como el número de interacciones sobre las diversas actividades de la población. Para ello, se precisa una metodología de análisis de riesgo hidrológico que implemente los factores que caractericen éste con un enfoque integral, mediante la construcción de indicadores definitorios del sistema a analizar y vinculados estos a dicha amenaza hidrológica. Este trabajo propone delimitar y analizar aquellos factores que involucran al riesgo, así como su variabilidad a partir de una expresión analítica que permita la obtención de la estimación de daños en dichas infraestructuras, descomponiendo los factores intervinientes en la ecuación del riesgo, analizando su variabilidad según las características intrínsecas vinculantes a las mismas, así como la interacción con factores externos a estas.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones (Directiva 2007/60 de evaluación y gestión de los riesgos de inundación tras puesta al ordenamiento jurídico español mediante el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación), representan un riesgo cada vez más frecuente, como consecuencia de la ocurrencia de los episodios extremos de precipitación (Arnell & Gosling, 2016). Con independencia de otros factores desencadenantes de los efectos catastróficos que representan estos eventos, que incrementan la pérdida de vidas humanas (Birkmann, 2006), como los daños en las infraestructuras esenciales tanto desde el punto de vista físico como operacional, afectando en gran medida la normal actividad de los ciudadanos, cuyas consecuencias se acentúan en entornos urbanos de mayor complejidad donde la holística que se desarrolla entre sus diversos componentes afectada en gran medida (Barbat & Cardona, 2003).

A pesar del desarrollo tecnológico y la mejora de procesos e implementación de medidas de incremento de la resiliencia y la mejora de la gestión de las infraestructuras, así como el incremento de la acción preventiva, son frecuentes los episodios catastróficos de naturaleza hidrológica ocasionando pérdida de vidas humanas e importantes daños en las infraestructuras, generando inseguridad en la población e importantes costes económicos (Martínez-Gomariz et al. 2020).

El análisis del riesgo hidrológico desde el punto de vista territorial ya sea a nivel de cuenca hidrográfica, provincia, comunidad autónoma, país, etc. se vincula a esta la vulnerabilidad de todos o al menos los elementos más significativos susceptibles de ser afectados, con independencia de los parámetros críticos de amenaza considerados. En unos casos, se realiza una valoración de daños por unidad de superficie (€/m^2) según la tipología de infraestructura potencialmente afectada, incorporando en la superficie de análisis el nivel de amenaza obteniendo un mapa de riesgo identificado este por el nivel de daño obtenido. A modo de ejemplo, y constatado en diversas investigaciones, caracterizadas las superficies, y localizados los diferentes componentes ubicados en las mismas (cultivos, industrias, zonas urbanas, hospitales, colegios, organismos oficiales, e infraestructuras esenciales, en general) se asignan valores por unidad de superficie (mapas de riesgo y de daños potenciales), obteniendo así la valoración de pérdidas económicas (Gracia et al., 2010). Así, por ejemplo, en el caso de infraestructuras en terrenos con calificación industrial se les asigna un valor de 458€/m^2 mientras que para terrenos urbanos corresponderían 434€/m^2 , asignando al contenido de la infraestructura un valor de 152€/m^2 y 102€/m^2 respectivamente.

En otros casos, además de la caracterización de la amenaza hidrológica, se plantea la vulnerabilidad de las infraestructuras afectadas de manera analítica, estimando la susceptibilidad y la criticidad de cada una de ellas en base a indicadores o valoraciones ponderadas, dado que en ciertas metodologías de análisis se diferencia la afectación física de la infraestructura, de la operacional (Hernández-Uribe et al., 2017; Osés-Eraso & Foudi, 2020; Serrano-Lombillo et al., 2011). Igualmente se plantean valoraciones cualitativas, dada la complejidad de obtener datos reales, así como la heterogeneidad de estos.

Ante el cambio climático, con la mayor frecuencia de episodios extremos de inundación, la capacidad de adaptación de la infraestructura urbana se hace más evidente, y es por ello que la Administración Pública está incorporando nuevos diseños y elementos adaptados para incrementar la capacidad de respuesta de las infraestructuras urbanas. Para ello se están editando

guías específicas, como las de la Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2003), FEMA-HAZUS (2004), y Ministerio para la Transición Ecológica, (MITECO, 2019).

Para el caso de las infraestructuras esenciales, y las hidráulicas en particular se realiza una completa caracterización de éstas (Yu et al., 2021), y la correspondiente definición de los indicadores representativos, tanto físicos como operacionales mejora el nivel de estimación de la vulnerabilidad de los diferentes componentes de dichas infraestructuras (Egea et al., 2018). A su vez un análisis microzonal o local de la amenaza, con una caracterización integral de los factores críticos que la definen, además de un pormenorizado análisis de su incidencia resulta fundamental para vincular e integrar dichos factores de amenaza en el riesgo hidrológico.

En la investigación desarrollada, se propone un análisis diferente, donde siguiendo diversos postulados, estudios y experiencias se plantea una metodología de aplicación, de análisis del riesgo hidrológico en las infraestructuras hidráulicas (Egea, 2018), que puede ser igualmente de aplicación a otras tipologías de infraestructuras críticas, dado su carácter generalista, y su vez integral, ya que todos sus indicadores están vinculados y jerarquizados. Es mediante el desarrollo matemático de indicadores, de funciones características y de algoritmos como se ha constituido la metodología de análisis de daños, que se plantea en la presente investigación. Se pretende así contribuir a mejorar la caracterización de la susceptibilidad y la resiliencia de las infraestructuras hidráulicas urbanas, la obtención de los umbrales de daño y su variabilidad vinculada al nivel de amenaza hidrológica, y por ende la toma de decisiones.

De otra parte, y según la ecuación general de riesgo mayoritariamente aceptada, adaptada a la amenaza hidrológica identifica el riesgo potencial con la mayor o menor vulnerabilidad de un territorio o infraestructura lo que se podría traducir en un nivel de daño estimado o esperado. Si consideramos la vulnerabilidad, tal como se ha indicado, como la susceptibilidad al daño potencial, o lo que es lo mismo, al grado de capacidad para soportar los efectos de la amenaza, es evidente que para analizar el riesgo potencial de forma específica y más precisa se debería previamente, considerar una caracterización exhaustiva y pormenorizada de la infraestructura potencialmente afectada según su particularidad o su tipología mediante la desagregación del término “vulnerabilidad”. Para ello, se proponen las siguientes expresiones, que incorporan nuevos factores definitorios de los componentes del riesgo, a la vez de estructurar de manera diferencial los mismos.

Metodología propuesta:

$$R_H = A_{H0} \cdot \prod_{g=1}^{G(H)} F_{pH} \cdot V_H = A_H \cdot \alpha_0 \cdot \frac{S_{Hh}}{\alpha_{Hh}}$$

Siendo,

R_H : riesgo hidrológico potencial estimado.

A_{H0} : amenaza hidrológica inicial o parámetro crítico de amenaza hidrológica.

F_{pH} : factores de amenaza hidrológica.

V_H : vulnerabilidad hidrológica de la infraestructura.

S_{Hh} : susceptibilidad hidrológica de la infraestructura.

α_{Hh} : resiliencia hidrológica de la infraestructura.

α_0 : factor de normalización (0,10) correspondiente a la región de existencia de valores de vulnerabilidad.

Otra expresión equivalente del riesgo hidrológico potencial sería,

$$R_H = D_{Hcorr.} + \lambda$$

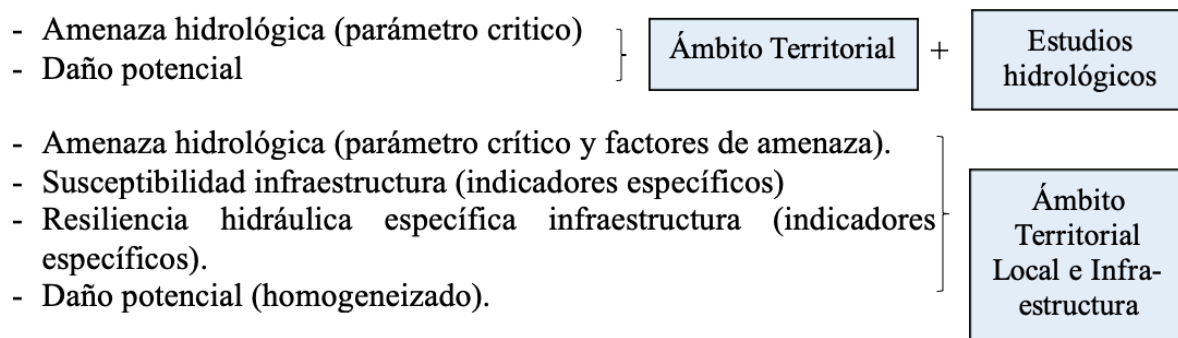
Donde,

R_H : riesgo hidrológico potencial estimado.

$D_{Hcorr.}$: daño hidrológico corregido estimado.

λ : coeficiente (dependiente de factores externos al Sistema de Infraestructuras con potencial afectación a este, como las interferencias con otras infraestructuras o servicios, además de condiciones económicos, sociales y medioambientales locales).

A su vez, $D_{Hcorr.} = D_{Hi} \pm f$, siendo D_{Hi} el índice de daño hidrológico inicial, y f el factor de forma dependiente del sistema de infraestructuras, estableciendo unos límites superior e inferior de valores umbrales de daño.



2. OBJETIVOS

A continuación, se resumen los objetivos principales que se pretenden con la investigación realizada:

1. Establecimiento de rangos y valores umbrales superior e inferior de daños potenciales generados por episodios de amenaza hidrológica.
2. Desarrollo y propuesta de funciones matemáticas características de la susceptibilidad y la resiliencia específica de la infraestructura hidráulica frente a la amenaza hidrológica.
3. Definición del factor crítico más representativo de la amenaza hidrológica y su vinculación con el daño potencial estimado.
4. Análisis y desarrollo de un algoritmo matemático de definición del daño hidrológico. Ho-

mogeneización de valores de daño.

5. Análisis y propuesta de relaciones matemáticas que vinculan el índice de riesgo, daño potencial y vulnerabilidad hidrológica.
6. Desarrollo analítico del índice de daño y propuesta de factores vinculados al índice de riesgo hidrológico.

3. METODOLOGÍA

3.1. Estado de la cuestión

En la actualidad existe una extensa bibliografía específica de análisis de riesgo con diferentes planteamientos (Pinos et al., 2017), probabilista y determinista (Hernández-Uribe et al., 2017). Se originan así diferentes metodologías de análisis de riesgos, tanto descriptivas como analíticas, que permiten estimar además del riesgo, los posibles daños generados.

Como indican las investigaciones de Gerl et al. (2016), los daños generados por la falta de resiliencia de una infraestructura ante una amenaza se pueden traducir en costes económicos (DELNET-ONU, 2009). El grado de gravedad del impacto de la amenaza y la vulnerabilidad de un territorio definen el daño potencial, por lo que este análisis posibilita la conformación de una herramienta de planificación territorial, a la vez que generar una cartografía de riesgo de inundación permitiendo realizar análisis de alternativas y planificación de inversiones para la toma de decisiones (Merz et al., 2010).

ISDR-ONU (2000) representa una estrategia internacional (ONU) de análisis global de desastres que plantea estrategias de mitigación de daños, promoviendo una “cultura de prevención” para la mitigación de sus efectos. La Generalitat Valenciana presentó una metodología de prevención del Riesgo de Inundación de la Comunidad Valenciana, PATRICOVA (2015) que incorpora los postulados de Directiva Europea de prevención del riesgo de inundación EU (Directiva 2007/60/C), incidiendo en la evaluación de daños potenciales en la infraestructura mediante variables hidráulicas (calado y velocidad). Las investigaciones planteadas por Cardona (2004-2006), Carreño (2007b) y Birkmann (2006) se circunscriben al análisis del riesgo sísmico, aunque en el caso de Birkmann (2006), el planteamiento es más generalista. Barbat y Cardona (2003) estudian la gestión del riesgo mediante indicadores. Martínez-Gomariz et al., (2020) analizan los diferentes aspectos de las curvas de vulnerabilidad (calado-daño) y su aplicación a entornos urbanos (Proyecto RESCUE). Russo et al., (2011) analizan la peligrosidad en entornos urbanos relacionada con el cambio climático. El riesgo de inundación y la cuantificación de daños en los entornos urbanos es analizada por Escuder et al. (2013) en el proyecto SUFRI “Sustainable strategies of Urban Flood Risk Management to cope with the residual Risk”, y en el proyecto iPRESARA “Incorporación de los componentes de riesgo antrópico a los sistemas de gestión integral de seguridad de presas y embalses” al igual que Hammond et al. (2015) analiza el impacto de las inundaciones en los núcleos urbanos, y Ten Veldhuis (2011) que analiza los daños tangibles e intangibles ocasionados por episodios de inundación, entre otros.

De otra parte, el desarrollo de guías de recomendaciones, buenas prácticas y diseño de elementos de drenaje aporta herramientas de resiliencia para adaptación al cambio climático (Ministerio para la Transición Ecológica, MITECO, 2017-2019).

3.2. Metodología propuesta

La caracterización de la infraestructura hidráulica por medio de indicadores resulta especialmente adecuada para una caracterización de las infraestructuras desde el punto de vista del riesgo y de la adaptación al cambio climático, como se propone en la presente investigación, siguiendo algunos de los postulados de las investigaciones de Cardona (2006), Carreño (2005) e IDEA (2005), siendo esta última “Development of Risk Management Indicators” una investigación conjunta del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Universidad de Manizales, Colombia, lo que permite obtener los siguientes hitos:

- Definición física y operacional de la Infraestructura hidráulica, y su análisis de susceptibilidad potencial, obteniendo así la capacidad de respuesta (resiliencia) de los componentes de la infraestructura hidráulica frente a la amenaza hidrológica, (PAHO, OPS. 1998).
- Planificación de actuaciones, e implantación de medidas de adaptación, prevención y mitigación (resiliencia) ante potenciales eventos de las amenazas analizadas.
- La integración de procesos (enfoque holístico), de adaptación de la infraestructura hidráulica a la dinámica de las amenazas, disminuyendo la incertidumbre y el grado de afectación.
- Seguimiento (evolución temporal) del comportamiento de la infraestructura hidráulica, por componente básico y el sistema de infraestructuras hidráulicas en su conjunto.

En la Figura 1, se presenta el esquema conceptual de la metodología, donde el riesgo (R) se calcula mediante el producto de la amenaza o peligrosidad (A) caracterizada por una magnitud y una frecuencia o periodo de retorno, y la vulnerabilidad (V) en este caso de la infraestructura. La amenaza (A), en este caso hidrológica, vendrá caracterizada por uno o varios factores críticos y otros factores de amenaza complementarios de carácter más específico. La vulnerabilidad V_{HP} se calcula mediante el análisis de la susceptibilidad (S) y de la resiliencia específica. La susceptibilidad se define mediante los indicadores físicos y operacionales, que permiten gestionar y evaluar el estado de los distintos componentes esenciales del sistema de infraestructuras hidráulicas. Los indicadores de resiliencia específica permiten cuantificar el efecto de la amenaza hidrológica en la infraestructura hidráulica.

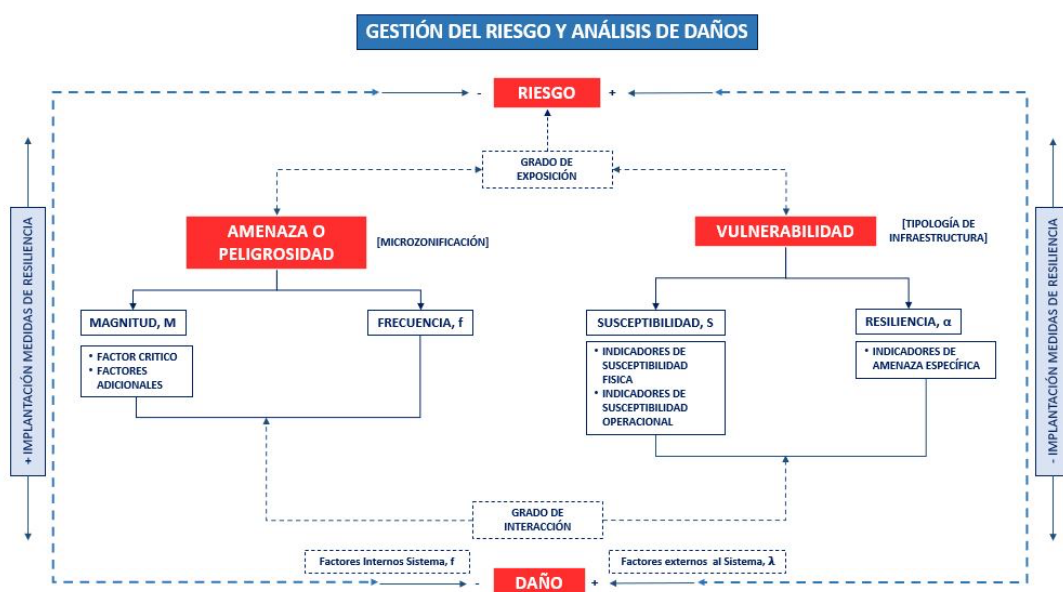


Figura 1. Esquema conceptual de la metodología. Fuente: elaboración propia.

De manera general, en la ecuación (1) se presenta el riesgo específico para la amenaza k e i tipologías de infraestructura. El riesgo se cuantifica en unidades de daño, la amenaza específica en unidades del parámetro crítico de esta $[Uc_k]$ y la vulnerabilidad en unidades de daño por unidad del parámetro crítico de la amenaza específica y los parámetros de amenaza específica en su caso $[Daño \cdot Uc_k^{-1}]$.

$$R_{ki}[Daño] = A_k[Uc_k] \cdot V_{ki}[Daño \cdot Uc_k^{-1}] \quad (1)$$

En la ecuación (2) se presenta la amenaza (A_k) obteniéndose la misma mediante la multiplicación del parámetro crítico de amenaza (Pp_k) y los $G(k)$ factores de amenaza (Fp_{kg}), los cuales pueden acentuar o atenuar la incidencia del parámetro crítico.

$$A_k[Uc_k] = Pp_k[Uc_k] \cdot \prod_{g=1}^{G(k)} Fp_{kg}, \quad (2)$$

siendo,

$$Pp_k[Uc_k] = A_0[Uc_k]$$

La ecuación (3a) presenta los factores de amenaza (Fp_{kg}) y la amenaza k , y la multiplicatoria de los $G(k)$ factores de amenaza (Fp_{kg}), según la ecuación (3b), los cuales pueden acentuar o atenuar la incidencia del parámetro crítico.

$$Fp_{kg} = 1 + \left(W_{Fp_{kg}} \cdot \left(\sum W_{Fp_{kgmáx}} - n \right) \cdot W_{Fp_{kgmáx}} \right) \quad (3a)$$

Siendo, n el número de factores de amenaza propuestas, que se recomienda al menos 3, como se ha propuesto en este caso.

$$\prod_{g=1}^{G(k)} Fp_{kg} = Fp_{kg_1} \cdot Fp_{kg_2} \cdot Fp_{kg_3} \quad (3b)$$

La amenaza queda entonces representada por la ecuación (3c), siendo $W_{Fp_{kgmáx}}$ el peso máximo de los factores de amenaza específica, y Pp_k el parámetro crítico, que define el valor de la amenaza inicial.

$$A_k[Uc_k] = A_0[Uc_k] \cdot \prod_{g=1}^{G(k)} Fp_{kg} \quad (3c)$$

En la ecuación (4) se presenta la vulnerabilidad (V_{ki}) para cada una de las k amenazas e i tipologías de infraestructura, se calcula mediante la división entre la susceptibilidad intrínseca (S_i) de la infraestructura y la resiliencia específica del componente i a la amenaza k (α_{ki}).

$$V_{ki}[Daño \cdot Uc_k^{-1}] = \frac{S_i[\dots]}{\alpha_{ki}[Uc_k \cdot Daño^{-1}]} \quad (4)$$

En la ecuación (5) se presenta la expresión de la susceptibilidad intrínseca de cada tipología de la infraestructura hidráulica, identificando dos principales componentes: la susceptibilidad física (Sf_i , determinada por los F_i indicadores de susceptibilidad física y la susceptibilidad operacional (So_i , determinada por los O_i indicadores de susceptibilidad operacional).

$$S_i[\square] = Sf_i[\square] + So_i[\square] = \sum_{n=1}^{F_i} Wsf_{in} \cdot Isf_{in} + \sum_{j=1}^{O_i} Wso_{ij} \cdot Iso_{ij} \quad (5)$$

En la ecuación (6) se presenta el detalle del cálculo de la resiliencia de cada componente *i* frente a la amenaza *k*, esta se define mediante los índices de resiliencia ($I\alpha_{kil}$).

$$\alpha_{ki}[Uc_k \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{ki}} W\alpha_{kil} \cdot I\alpha_{kil} [Uc_k \cdot Daño^{-1}] \quad (6)$$

Finalmente, de manera genérica en la ecuación (7) se presenta el riesgo específico del componente *i* frente a la amenaza *k*.

$$R_{ki}[Daño] = A_k[Uc_k] \cdot \frac{S_i[\square]}{\alpha_{ki}[Uc_k \cdot Daño^{-1}]} \quad (7)$$

Sin embargo, el daño representado por el índice de daño potencial homogeneizado corregido ($I_{Dcorr.}$) que se indica en las figuras 3 y 4, vendría realmente expresado en base a la investigación propuesta, según la siguiente expresión,

$$R_k = I_{Dkcorr.} + \lambda, \quad (8)$$

Siendo,

λ : coeficiente dependiente de factores externos al Sistema de infraestructuras.

$I_{Dcorr.}$: $I_{Di} \cdot V_k$; índice de daño potencial homogeneizado corregido a partir del índice de daño inicial calculado I_{Di} y del factor de forma *f* estimado, variable según las características intrínsecas del Sistema según la vulnerabilidad y el nivel de amenaza.

I_{Di} : índice de daño potencial inicial.

$$I_{Di}: I_{D0} \pm f$$

I_{D0} : Índice de daño inicial básico.

f: factor de forma dependiente de factores internos al Sistema de infraestructuras.

3.3. Desarrollo metodológico

La metodología propuesta se desarrolla a partir de las amenazas específicas y la vulnerabilidad de los componentes de la infraestructura hidráulica definida por los indicadores de susceptibilidad y de resiliencia de acuerdo con los postulados de Egea, R. (2018), además de las consideraciones de Cardona (2004), Carreño (2005), Carreño et al. (2006), Barbat y Pujades (2004) o Carreño (2007b). A continuación, en la Figura 2 se muestra un esquema general del modelo metodológico de análisis de riesgos propuesto, replicable a cualquier sistema, con las salvedades indicadas en las investigaciones analizadas.

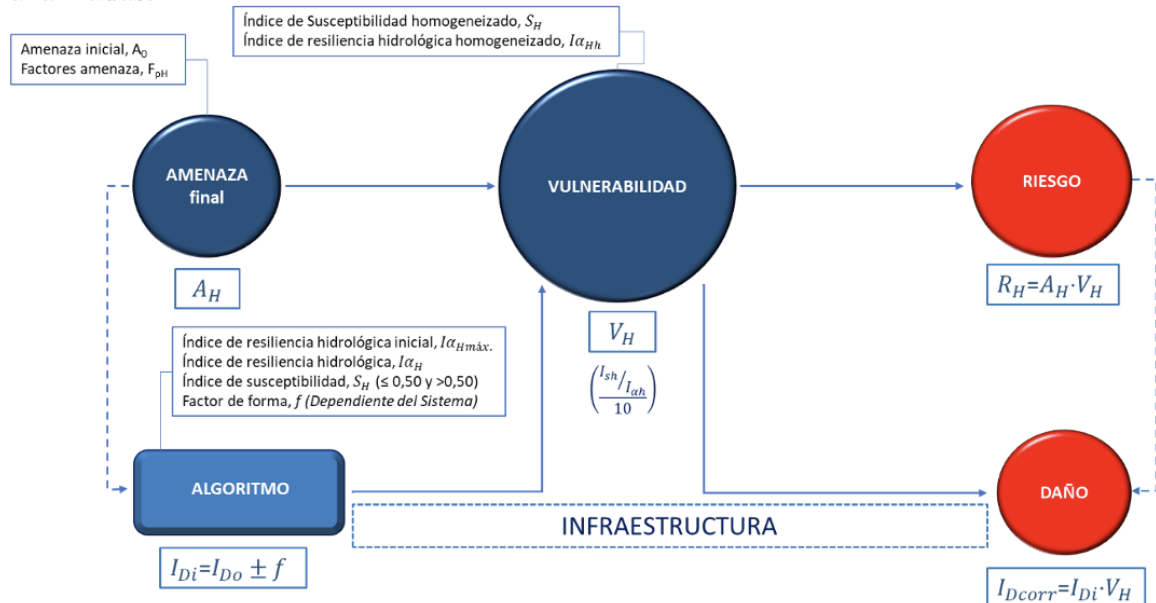


Figura 2. Esquema metodológico de análisis de daños propuesto. Fuente: elaboración propia.

- Índices de daño potencial específico, I_D

$$I_{Df} = \frac{S_{fh}}{S_{th}} \cdot \frac{I_{Di}}{I_{\alpha i}} \cdot R_{ki}$$

$$I_{Do} = \frac{S_{oh}}{S_{th}} \cdot \frac{I_{Di}}{I_{\alpha i}} \cdot R_{ki}$$

Siendo,

I_{Df} : índice de daño físico potencial

I_{Do} : Índice de daño operacional potencial

S_{fh} : Susceptibilidad física homogeneizada.

S_{oh} : Susceptibilidad operacional homogeneizada.

S_{th} : susceptibilidad total homogeneizada.

I_{Di} : índice de daño potencial inicial.

$I_{\alpha i}$: Índice de resiliencia inicial.

R_{ki} : Riesgo de amenaza específica.

- Índice de daño potencial corregido, I_{Dcorr} . se obtiene a partir del índice de daño inicial calculado anteriormente, es decir el índice de daño inicial obtenido en las tablas se debe corregir mediante el factor $\left(\frac{I_{sh}}{I_{ah}}\right) \cdot \alpha_0$, según la siguiente expresión:

$$I_{Dcorr} = I_{Di} \cdot \left(\frac{I_{sh}}{I_{ah}}\right) \cdot \alpha_0$$

Siendo,

I_{Di} : Índice de daño potencial inicial.

I_{sh} : Índice de susceptibilidad homogeneizada.

I_{ah} : Índice de resiliencia homogeneizada.

α_0 : índice de resiliencia residual (0,10). El índice de resiliencia residual α_0 es el valor umbral inferior de la resiliencia a partir del cual se considera ésta.

A continuación, en la Figura 3, se indica el desarrollo analítico y la secuencia de obtención de los diferentes índices además de la definición de estos, y las expresiones propuestas para su obtención.

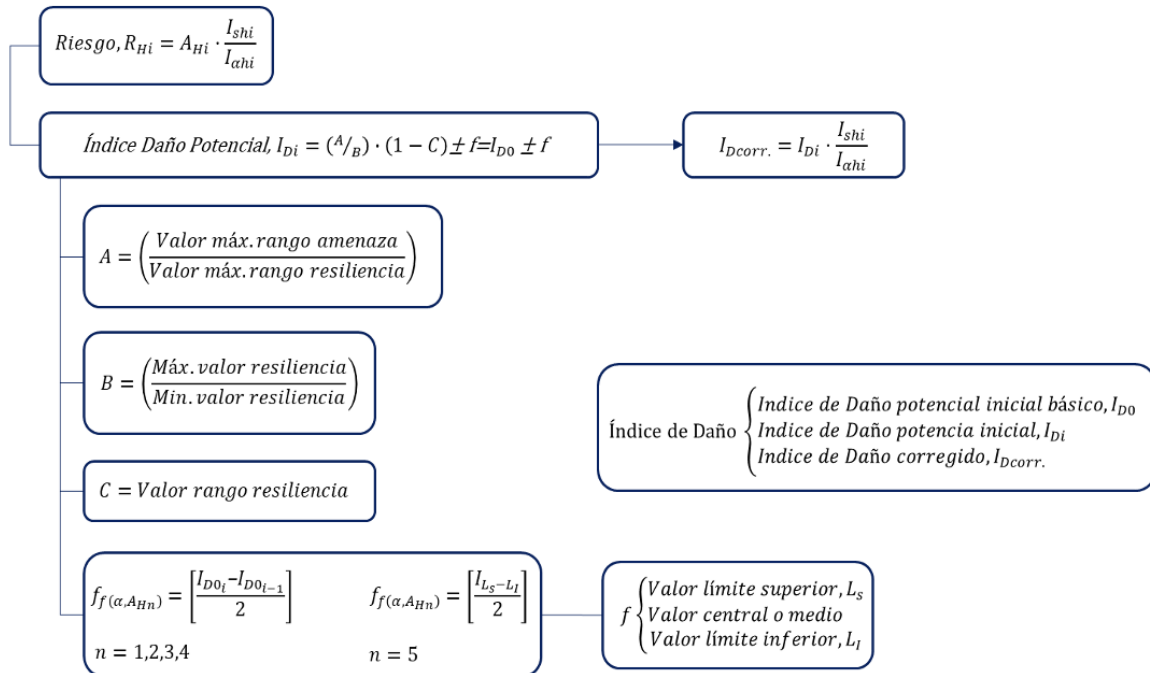


Figura 3. Flujograma para la obtención de los índices de daño de la amenaza hidrológica y las expresiones matemáticas utilizadas (algoritmos). Fuente: elaboración propia.

La construcción de los diferentes indicadores e índices descritos, y que se utilizan en los algoritmos planteados son los que se analizan y proponen en las investigaciones publicadas por Egea (2018) resumidas en los diferentes epígrafes de la presente propuesta metodológica.

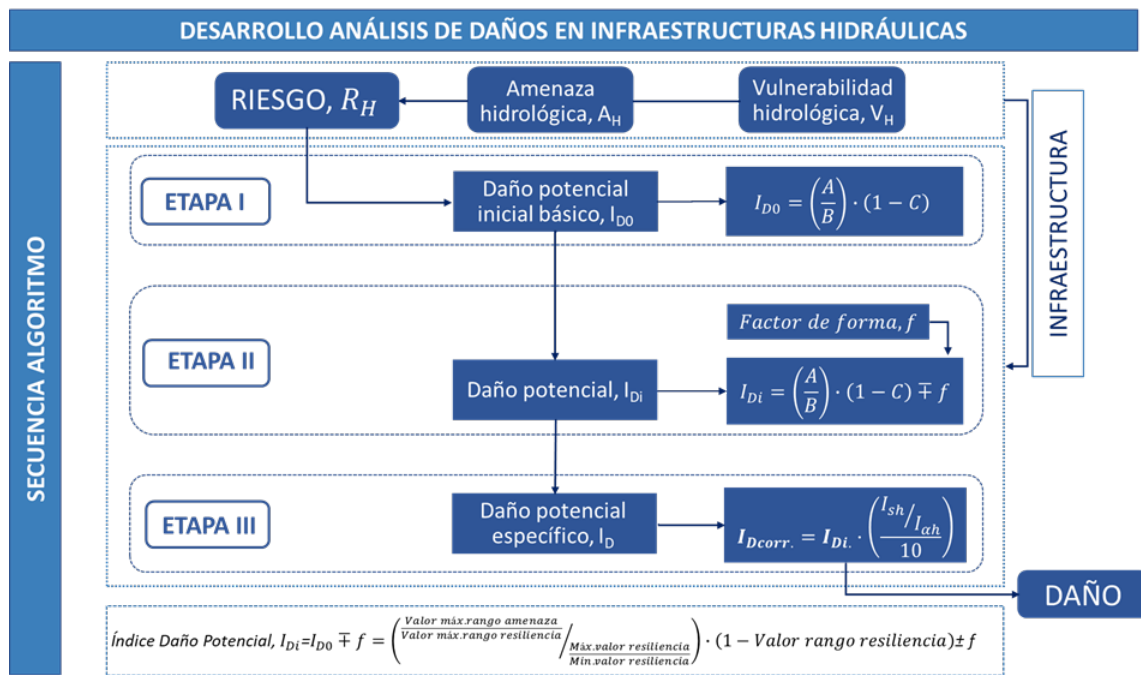


Figura 4. Modelo metodológico de análisis de riesgos propuesto. Fuente: elaboración propia.

Se plantean dos niveles de desarrollo de la susceptibilidad y de la resiliencia en las infraestructuras, por lo que mediante la construcción de indicadores que posibiliten la obtención de índices parametrizados y definitorios de aquellas (susceptibilidad y resiliencia) que integran en este caso, de manera intrínseca el grado de resiliencia y el nivel de la amenaza hidrológica final (microzonificación hidrológica), para cada nivel de desarrollo de la susceptibilidad indicados ($0 < Si \leq 0,50$, y $0,50 < Si \leq 0,99$).

El establecimiento de estos niveles obedece al diferente grado de desarrollo del Sistema de Infraestructuras según su localización, entre otros aspectos, y para que sea posible aplicar la metodología expuesta haciéndola extensiva a cualquier sistema de infraestructuras y lugar.

Del análisis realizado, así como de la consulta de otras investigaciones vinculadas se constata un diferente incremento de variación del daño según el parámetro de amenaza o bien el nivel de vulnerabilidad, siguiendo dicho valor del daño, igualmente diferentes funciones de distribución (log-normal, logarítmica, exponencial, potencial, lineal, etc.).

Según el análisis realizado en esta investigación, se observa que el nivel de daño decrece con el incremento del nivel de resiliencia y el decremento de la susceptibilidad, Si comprendido este último en el rango $0,50 < Si \leq 0,99$, según (Figura 5).

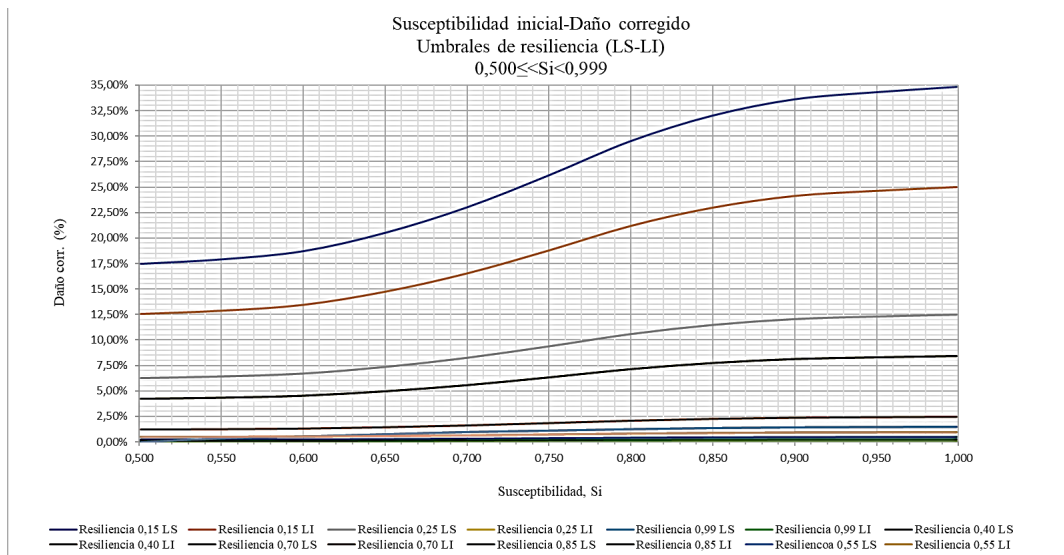


Figura 5. Gráfica de evolución de daños según intervalos y límites superior, L.S. e inferior, L.I. en relación con la susceptibilidad $0,500 \leq S_i < 0,999$, y los diferentes niveles de resiliencia, y para un determinado nivel de amenaza hidrológica, en este caso nivel 4 de amenaza hidrológica ($0, 30 \leq r_2 A_H \leq 0,45$). Fuente: elaboración propia.

El incremento de daño en este caso, al ser lineal, es decir siguiendo una función de distribución del tipo $I_{D_{corr.}} = a \cdot I_{S_i} - b$, donde,

$I_{D_{corr.}}$: índice de daño corregido.

I_{S_i} : índice de susceptibilidad inicial.

a y b: parámetros de la función lineal.

presenta un desarrollo según se indica en las funciones gráficas de la Figura 6, donde como ejemplo de aplicación se observa la variación del valor del daño con relación a los índices de susceptibilidad y de resiliencia.

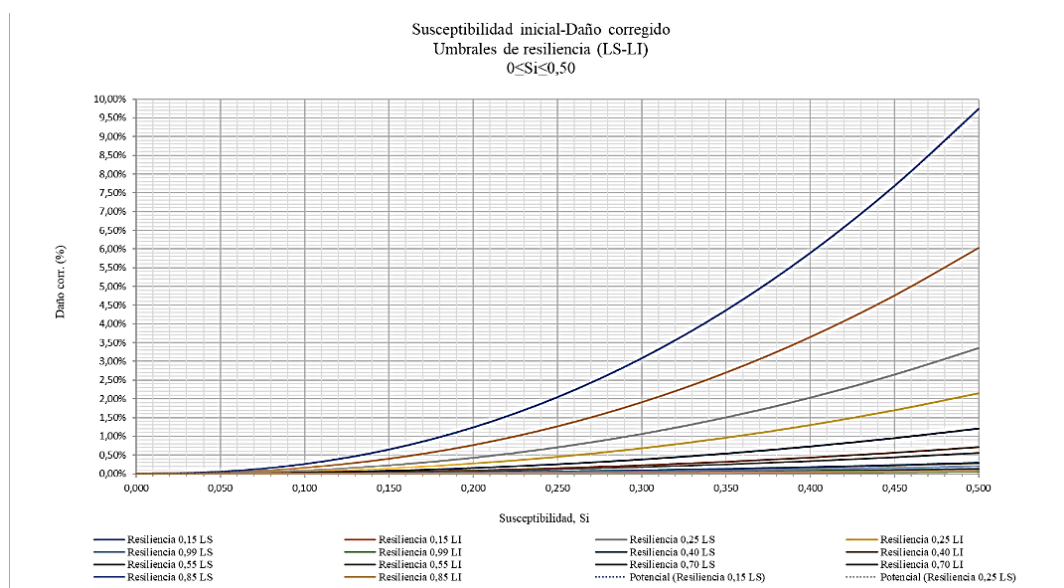


Figura 6. Gráfica de evolución de daños según intervalos (L.S. y L.I.) en relación con la susceptibilidad $0 \leq S_i \leq 0,50$ y los diferentes niveles de resiliencia, y para un determinado nivel de amenaza hidráulica, en este caso nivel 4 ($0, 30 \leq r_2 A_H \leq 0,45$). Fuente: elaboración propia.

Dichos índices de susceptibilidad se obtienen mediante la definición, construcción y valoración de los indicadores específicos según la metodología propuesta, y desarrollada en esta investigación, correspondiente a las investigaciones llevadas a cabo por Egea (2018).

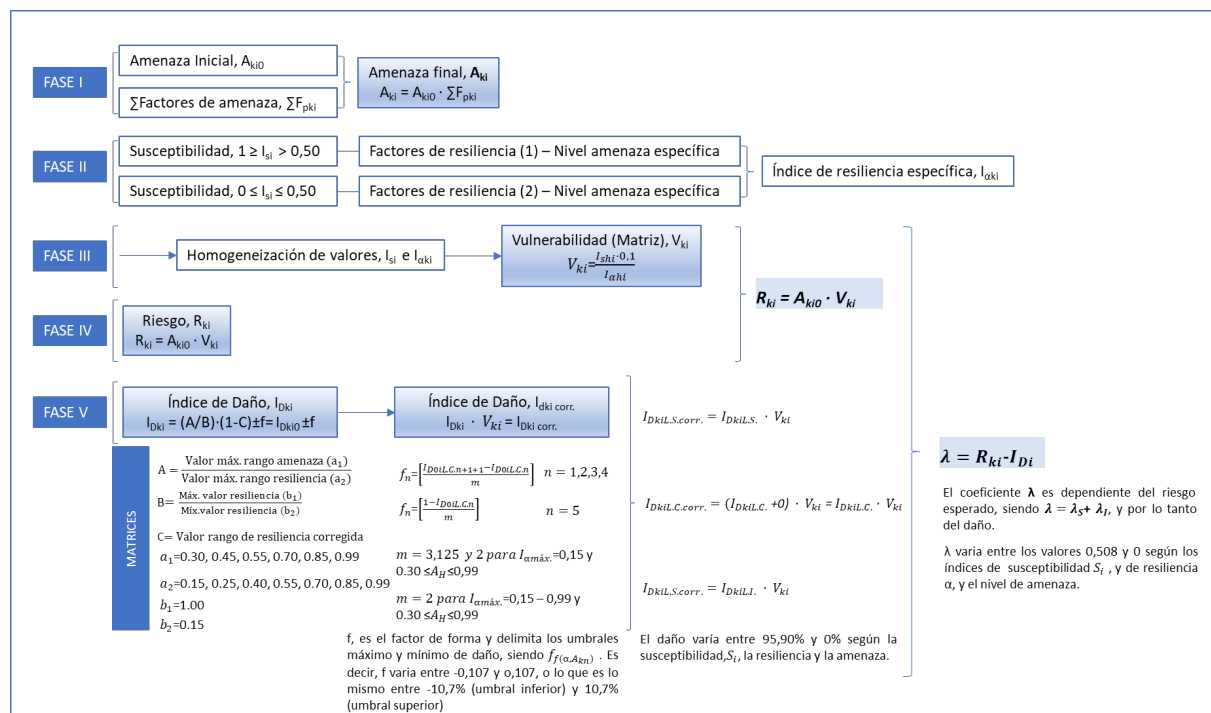


Figura 7. Modelo metodológico de análisis de riesgos propuesto. Fuente: elaboración propia.

Tras un análisis de tendencia de los valores de la resiliencia según el nivel de amenaza se constata que para una definición más precisa de la resiliencia, se hace necesario plantear dos niveles de resiliencia, en base a la susceptibilidad de un Sistema de Infraestructuras, al objeto de que haya una homogeneidad comparativa pues el grado de desarrollo de cada Sistema de Infraestructuras hidráulicas varía considerablemente atendiendo al grado de avance tecnológico, económico y de gestión que se lleve a cabo.

A continuación, se indica el desarrollo analítico de la obtención de los indicadores de resiliencia según el intervalo de amenaza hidrológica y el grado de susceptibilidad ($S > 0,50 \leq 0,99$ y $0,00 < S \leq 0,50$).

Caso Susceptibilidad de la Infraestructura hidráulica, $S > 0,50 \leq 0,99$.

| Indicador de resiliencia Hidrológica corregido (I_{ahc}) para una Susceptibilidad, Si en el rango ($0,99 \geq Si > 0,50$) | | | | | | |
|---|--|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Rangos de Indicadores de resiliencia | Indicador de resiliencia máxima ($I_{am\acute{a}x}$) | Rango de la amenaza H | | | | |
| | | $r_{1AH} < 0,30$ | $0,30 \leq r_{2AH} \leq 0,45$ | $0,45 < r_{3AH} \leq 0,60$ | $0,60 < r_{4AH} \leq 0,80$ | $0,80 < r_{5AH} \leq 1$ |
| $0 \leq r_{1a} \leq 0,15$ | 0,15 | 0,150 | 0,129 | 0,116 | 0,099 | 0,082 |
| $0,15 < r_{2a} \leq 0,25$ | 0,25 | 0,263 | 0,205 | 0,172 | 0,151 | 0,139 |
| $0,25 < r_{3a} \leq 0,40$ | 0,40 | 0,444 | 0,347 | 0,291 | 0,256 | 0,235 |
| $0,40 \leq r_{4a} \leq 0,55$ | 0,55 | 0,623 | 0,487 | 0,408 | 0,359 | 0,330 |
| $0,55 \leq r_{4a} \leq 0,70$ | 0,70 | 0,783 | 0,611 | 0,512 | 0,451 | 0,414 |
| $0,70 \leq r_{4a} \leq 0,85$ | 0,85 | 0,873 | 0,682 | 0,571 | 0,503 | 0,462 |
| $0,85 \leq r_{5a} < 1$ | 1,00 | 0,951 | 0,743 | 0,623 | 0,549 | 0,504 |

| Amenaza, A_H | | |
|---------------------------|--|----------------|
| $r1A < 0,30$ | $I_{\alpha H} = -0,5609(I_{am\acute{a}x})^2 + 1,6147I_{am\acute{a}x} - 0,0946$ | $R^2 = 0,9979$ |
| $0,30 \leq r2A \leq 0,45$ | $I_{\alpha H} = -0,406(I_{am\acute{a}x})^2 + 1,2165I_{am\acute{a}x} - 0,06$ | $R^2 = 0,997$ |
| $0,45 < r3A \leq 0,60$ | $I_{\alpha H} = -0,3189(I_{am\acute{a}x})^2 + 0,9898I_{am\acute{a}x} - 0,0411$ | $R^2 = 0,9964$ |
| $0,60 < r4A \leq 0,80$ | $I_{\alpha H} = -0,2886(I_{am\acute{a}x})^2 + 0,8827I_{am\acute{a}x} - 0,0395$ | $R^2 = 0,9964$ |
| $0,80 < r5A < 1$ | $I_{\alpha H} = -0,2897(I_{am\acute{a}x})^2 + 0,8448I_{am\acute{a}x} - 0,047$ | $R^2 = 0,9976$ |

Tabla 1. Índices de resiliencia corregidos según rangos, nivel de amenaza para un rango de susceptibilidad $0,50 < S \leq 0,99$. Funciones características de amenaza hidrológica y coeficiente de determinación R^2 . Fuente: elaboración propia.

Caso Susceptibilidad de la Infraestructura hidráulica $0,00 < S \leq 0,50$.

| Indicador de resiliencia Hidrológica corregido (I_{ahc}) para una Susceptibilidad, Si en el rango ($0 < Si \leq 0,50$) | | | | | | |
|--|--|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Rangos de Indicadores de resiliencia | Indicador de resiliencia máxima ($I_{am\acute{a}x}$) | Rango de la amenaza H | | | | |
| | | $r_{1AH} < 0,30$ | $0,30 \leq r_{2AH} \leq 0,45$ | $0,45 < r_{3AH} \leq 0,60$ | $0,60 < r_{4AH} \leq 0,80$ | $0,80 < r_{5AH} \leq 1$ |
| $0 \leq r_{1a} \leq 0,15$ | 0,15 | 0,300 | 0,219 | 0,162 | 0,119 | 0,082 |
| $0,15 < r_{2a} \leq 0,25$ | 0,25 | 0,420 | 0,328 | 0,275 | 0,242 | 0,222 |
| $0,25 < r_{3a} \leq 0,40$ | 0,40 | 0,600 | 0,469 | 0,393 | 0,346 | 0,318 |
| $0,40 \leq r_{4a} \leq 0,55$ | 0,55 | 0,760 | 0,594 | 0,497 | 0,438 | 0,402 |
| $0,55 \leq r_{4a} \leq 0,70$ | 0,70 | 0,900 | 0,703 | 0,589 | 0,519 | 0,476 |
| $0,70 \leq r_{4a} \leq 0,85$ | 0,85 | 0,960 | 0,750 | 0,628 | 0,554 | 0,508 |
| $0,85 \leq r_{5a} < 1$ | 1,00 | 0,999 | 0,780 | 0,654 | 0,576 | 0,529 |

| Amenaza, A_H | | |
|---------------------------|--|----------------|
| $r1A < 0,30$ | $I_{\alpha H} = -0,5609(I_{am\acute{a}x})^2 + 1,6147I_{am\acute{a}x} - 0,0946$ | $R^2 = 0,9979$ |
| $0,30 \leq r2A \leq 0,45$ | $I_{\alpha H} = -0,406(I_{am\acute{a}x})^2 + 1,2165I_{am\acute{a}x} - 0,06$ | $R^2 = 0,997$ |
| $0,45 < r3A \leq 0,60$ | $I_{\alpha H} = -0,3189(I_{am\acute{a}x})^2 + 0,9898I_{am\acute{a}x} - 0,0411$ | $R^2 = 0,9964$ |
| $0,60 < r4A \leq 0,80$ | $I_{\alpha H} = -0,2886(I_{am\acute{a}x})^2 + 0,8827I_{am\acute{a}x} - 0,0395$ | $R^2 = 0,9964$ |
| $0,80 < r5A < 1$ | $I_{\alpha H} = -0,2897(I_{am\acute{a}x})^2 + 0,8448I_{am\acute{a}x} - 0,047$ | $R^2 = 0,9976$ |

Tabla 2. Índices de resiliencia corregidos según rangos, nivel de amenaza para un rango de susceptibilidad $0,00 < S \leq 0,50$. Funciones características de amenaza hidrológica y coeficiente de determinación R^2 . Fuente: elaboración propia.

En las siguientes gráficas se puede observar la evolución de las funciones matemáticas que definen la resiliencia en base a la amenaza y el nivel de susceptibilidad.

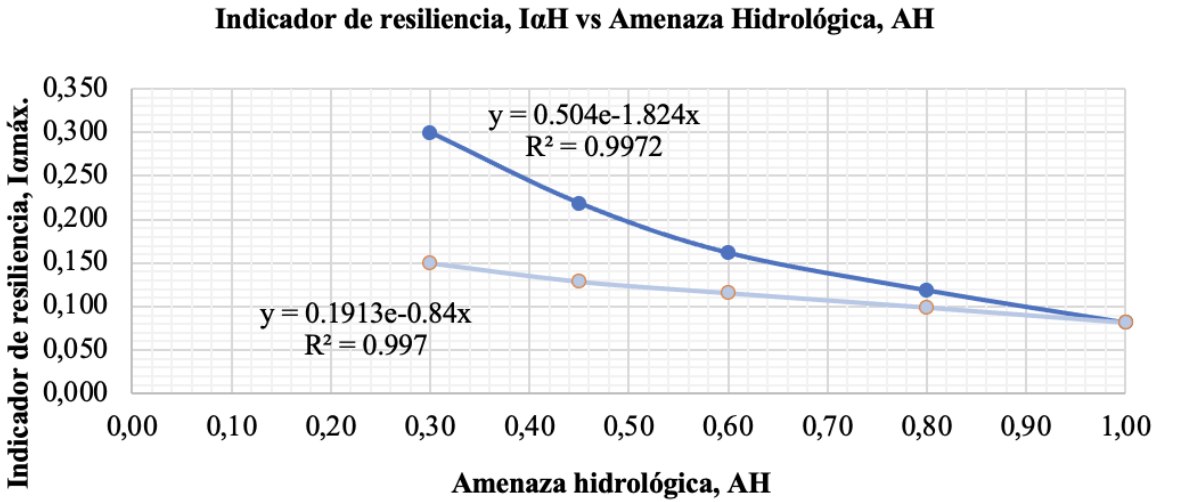


Figura 8. Variación del indicador de resiliencia con relación a los valores máximos de la amenaza hidrológica ($0 \leq r1\alpha \leq 0,15$) y $S \leq 0,50$. (1). Variación del indicador de resiliencia con relación a los valores máximos de la amenaza hidrológica ($0 \leq r1\alpha \leq 0,15$) y $S > 0,50$. (2). Fuente: elaboración propia.

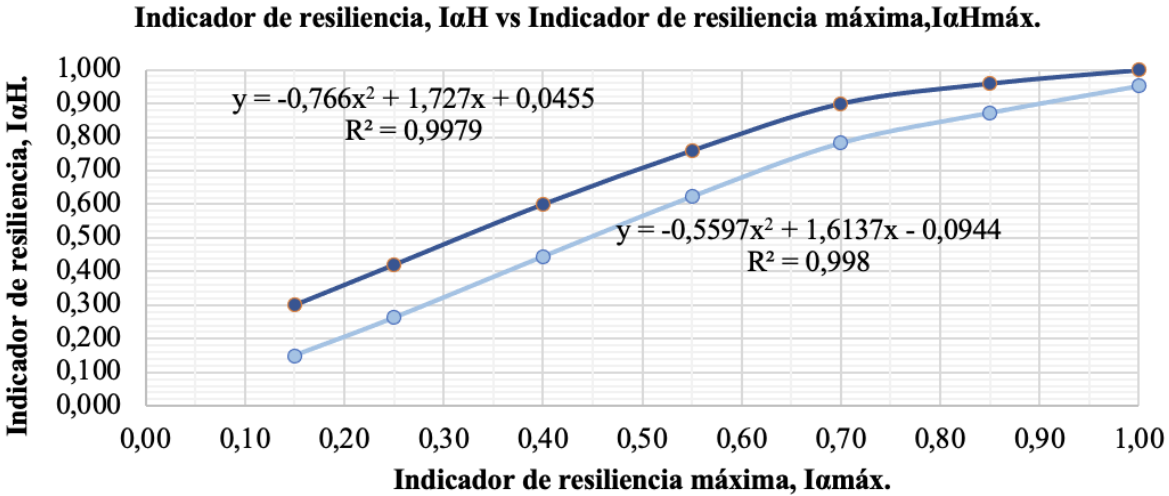


Figura 9. Variación de los valores del indicador de resiliencia con relación al valor máximo de la amenaza hidrológica, caso ($r1AH < 0,30$) y $S \leq 0,50$. (1) Variación de los valores del indicador de resiliencia con relación al valor máximo de la amenaza hidrológica, caso ($r1AH < 0,30$) y $S > 0,50$. (2). Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en las figuras 10 y 11 se grafía la evolución de los diversos componentes de la ecuación del riesgo hidrológico, y su correlación con el índice de daño final corregido. En estas se puede observar los intervalos de existencia de las variables del riesgo, según el nivel de amenaza, la susceptibilidad, la vulnerabilidad, así como el nivel de daño medio en este caso y el riesgo potencial obtenido.

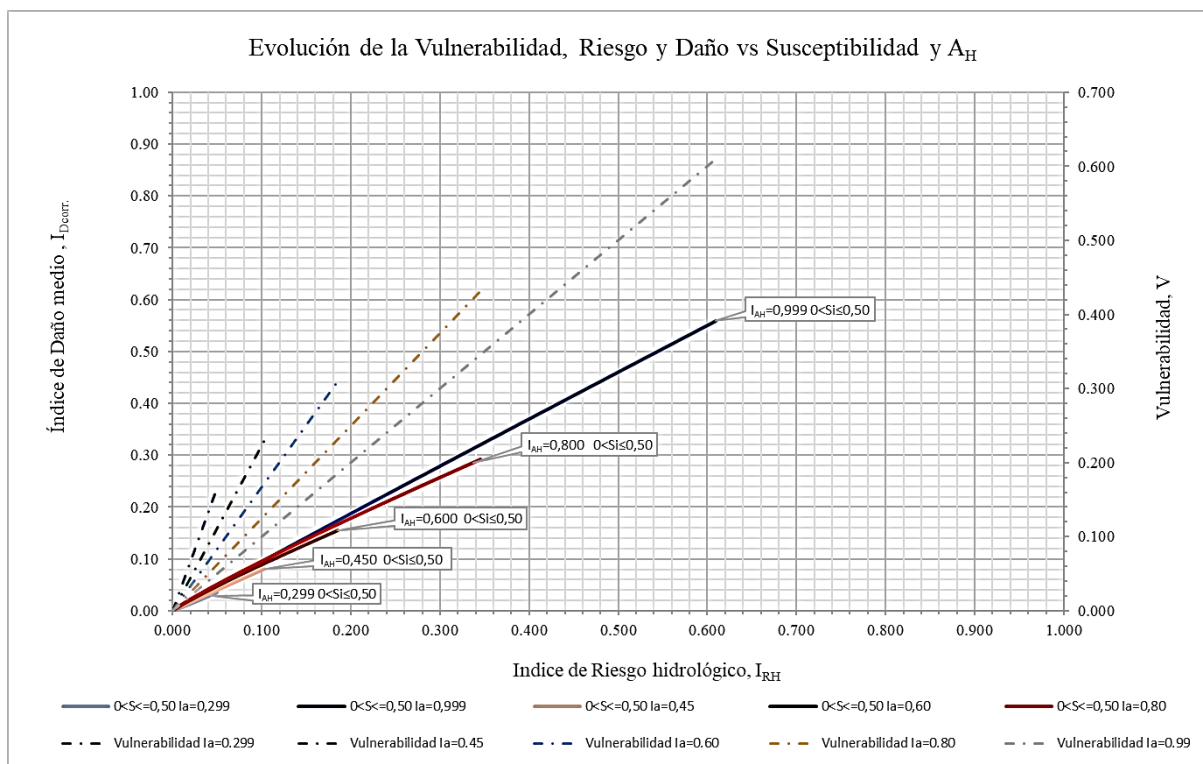


Figura 10. Evolución de las variables de riesgo según el nivel de susceptibilidad, en este caso $0 \leq I_s \leq 0,50$.
Fuente: elaboración propia.

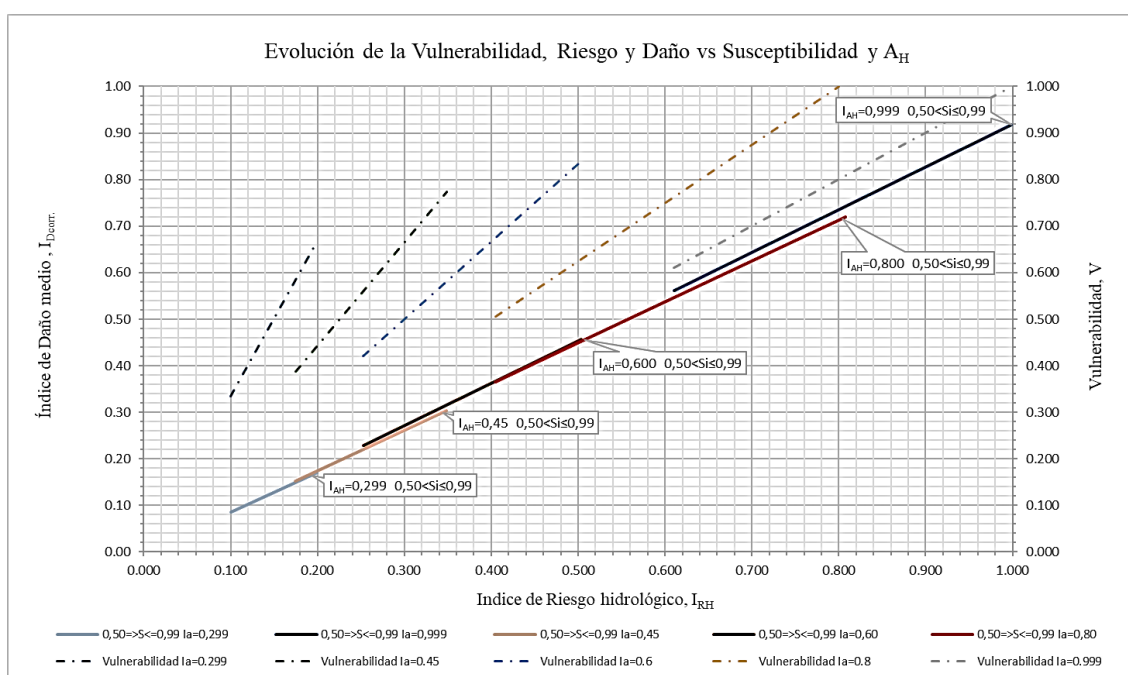


Figura 11. Evolución de las variables de riesgo según el nivel de susceptibilidad, en este caso $0,50 < I_s \leq 0,99$.
Fuente: elaboración propia.

La aplicación de la metodología desarrollada ayudaría, en la planificación de actuaciones de incremento de la resiliencia, mitigación de daños en caso de desastres naturales de origen hidrológico, así como en la gestión eficiente de la infraestructura hidráulica, incrementando la sostenibilidad de esta, a la vez de permitir un seguimiento de los indicadores representativos de la misma.

4. APLICACIÓN METODOLÓGICA

Al objeto de analizar la adecuación de la metodología expuesta desarrollada de manera sucinta en los anteriores apartados se propone su aplicación en relación con los postulados incluidos en la metodología desarrollada en el Plan Territorial del Riesgo de Inundación de la Comunidad Valenciana, PATRICOVA, que, aunque referida fundamentalmente al riesgo hidrológico del territorio, sus postulados pueden aplicarse al análisis de riesgo en infraestructuras. En esta se desarrolla el análisis de daños mediante la determinación de la altura de la lámina de agua que se puede alcanzar en el territorio y los posibles daños que se puedan generar tanto en edificaciones, explotaciones agrícolas y ganaderas, industrias y demás instalaciones e infraestructuras localizadas en el territorio.

| Nivel de Peligrosidad | Valor Índice (0-1) | Banda de variación (0-100) | Calado, Y (m) | Velocidad, V (m/s) | Parámetro estabilidad al vuelco, $V \cdot Y$ (m ² /s) | Parámetro estabilidad al deslizamiento, $V^2 \cdot Y$ (m ³ /s ²) | Tipo de afección |
|-----------------------|--------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|--|---|--|
| 1 | 1 | 100-80 | $Y \geq 3,00$ | $V > 2,50$ | $V \cdot Y \geq 7,00$ | $> 1,23$ | Zona de afección grave o muy grave (personas e infraestructuras) |
| 2 | 0.85 | 79-60 | $2,00 \leq Y < 3,00$ | $2,00 \leq V \leq 2,50$ | $V \cdot Y > 3,00$ | $> 1,23$ | |
| 3 | 0.65 | 59-45 | $1,00 \leq Y < 2,00$ | $2,00 > V \geq 1,50$ | $V \cdot Y \geq 1,50$ | $> 1,23$ | |
| 4 | 0.45 | 44-30 | $0,50 \leq Y < 1,00$ | $1,5 > V \geq 1,00$ | $V \cdot Y \geq 0,50$ | $\geq 1,23$ | Zona de afección leve o moderada (personas) |
| 5 | 0.30 | 29-15 | $0,15 < Y < 0,50$ | $1 > V \geq 0,50$ | $V \cdot Y \geq 0,25$ | $< 1,23$ | |
| 6 | 0.15 | 14-0 | $Y \leq 0,15$ | $V < 0,50$ | $V \cdot Y \leq 0,08$ | $< 1,23$ | |

Tabla 3. Niveles de peligrosidad hidrológica (Inundación Pluvial) en base a las variables hidráulicas, calado y velocidad ($V \cdot Y$), $V^2 \cdot Y$. Fuente: PATRICOVA (2015) adaptada.

Es de destacar que en relación con la morfología del terreno con pendientes superiores al 5% con velocidades de flujo de la escorrentía o de inundación superiores a 3m/s y aún con calados inferiores a 15cm, puede considerarse peligroso y con alta probabilidad de generar daños según la tipología de infraestructura como se analiza en el anexo 1 del PATRICOVA, por lo que resulta esencial contemplar ambas variables (calado Y, y velocidad V) y obtener así unos valores más aproximados a la realidad. No obstante, resulta igualmente necesario en el caso de analizar la vulnerabilidad de una determinada infraestructura, determinar la susceptibilidad y la resiliencia de esta en base a la definición de unos indicadores tanto físicos como operacionales, para lo que se propone la metodología desarrollada en la Tesis *doctoral "Investigación sobre modelos de gestión de infraestructuras hidráulicas urbanas resilientes en relación con los riesgos hidrológicos y geológicos"*, Egea (2018). Es a partir de la obtención de dichos indicadores que se propone el análisis de riesgo hidrológico, así como la estimación de daños mediante algoritmos y funciones matemáticas de daño desarrolladas y basadas en diversas investigaciones analizadas.

En la metodología propuesta en esta investigación se analiza el empleo de ambos parámetros, calado Y y velocidad V, de manera integral para obtener la amenaza o peligro hidrológico, y su vinculación con la vulnerabilidad de las infraestructuras.

| Nivel de Peligrosidad | Valor Índice (0-1) | Banda de variación (0-100) | Calado, Y (m) | Velocidad, V (m/s) | Parámetro estabilidad al vuelco, V·Y (m ² /s) | Parámetro estabilidad al deslizamiento, V ² ·Y (m ³ /s ²) | Tipo de afección |
|-----------------------|--------------------|----------------------------|---------------|--------------------|--|---|--|
| 1 | 1 | 100-80 | Y≥3,00 | V>2,50 | V·Y ≥7.00 | >1.23 | Zona de afección grave o muy grave (personas e infraestructuras) |
| 2 | 0.85 | 79-60 | 2,00≤Y<3,00 | 2,00≤V≤2,50 | V·Y >3.00 | >1.23 | |
| 3 | 0.65 | 59-45 | 1,00≤Y<2,00 | 2,00>V≥1,50 | V·Y ≥1.50 | >1.23 | |
| 4 | 0.45 | 44-30 | 0,50≤Y<1,00 | 1,5>V≥1,00 | V·Y ≥0.50 | ≥1.23 | Zona de afección leve o moderada (personas) |
| 5 | 0.30 | 29-15 | 0,15<Y<0,50 | 1>V≥0,50 | V·Y ≥0.25 | <1.23 | |
| 6 | 0.15 | 14-0 | Y≤0,15 | V<0.50 | V·Y ≤0.08 | <1.23 | |

Se establecen intervalos o umbrales límite superiores e inferiores para la definición de los índices de susceptibilidad y de resiliencia, así como niveles de amenaza hidrológica definidos en base a los parámetros calado y velocidad del flujo de inundación.

Es a partir de la integración de todas las variables que componen el riesgo, que se obtiene el índice de riesgo y el índice de daño, estableciendo para ello diversos valores límite superiores e inferiores para cada intervalo de susceptibilidad y de resiliencia.

Como ejemplo de aplicación y de comparación con la metodología “PATRICOVA” se propone el caso de una infraestructura hidráulica de un Sistema de abastecimiento de agua en la que se debe analizar su nivel de afectación para un calado Y de 0,50m.

PATRICOVA

Calado, Y (m.)

A partir de las curvas propuestas en esa metodología entrando en la gráfica con el calado estimado, Y=0,50m que se obtiene el daño estimado. Entrando en la curva de industria de la figura 10 con un calado Y=0,50m, se obtiene el 14% de daño, siendo el daño en el caso genérico del 5%.

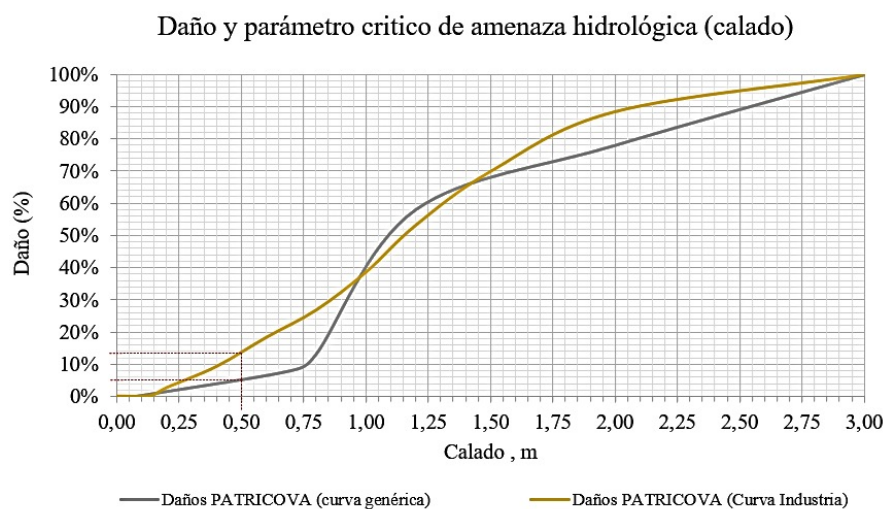


Figura 12. gráfica de análisis de daño-calado (curvas genérica e industrias) según PATRICOVA (2015).

Fuente: elaboración propia.

METODOLOGÍA PROPUESTA

Los valores obtenidos, mediante la metodología propuesta y utilizando únicamente el calado indicado $Y=0,50\text{m}$ son los que se indican en la tabla 4.

En relación con el resto de los parámetros, susceptibilidad y resiliencia, se han considerado los siguientes valores límite de susceptibilidad y una resiliencia inicial de 0,15, obteniendo igualmente los valores de los intervalos de daño estimados.

| Susceptibilidad, S_i (0-1) | Daño I_D corr. (%) | |
|---|----------------------|----------------------|
| Valor Límite Superior (LS) Intervalo ($0 \leq S_i \leq 0,50$) | Límite Superior (LS) | Límite Inferior (LI) |
| 0,99 | 28 | 19 |
| Valor Límite Inferior (LI) Intervalo ($0,50 < S_i \leq 0,99$) | Límite Superior (LS) | Límite Inferior (LI) |
| 0,50 | 7 | 4 |
| Resiliencia inicial, α (0-1) | | |
| 0,15 | | |

Tabla 4. Intervalos de valores límite de susceptibilidad S_i , resiliencia α y daño I_D . Fuente: elaboración propia.

Considerando ahora el producto calado Y y la velocidad V , de valor 0,50 según la tabla 3, se obtienen los siguientes valores de daño, entrando en la Figura 13, que se muestra a continuación. Se representan las funciones límite (superior e inferior) de daño según los valores umbrales de susceptibilidad, en este caso se ha fijado un nivel de resiliencia inicial =0,15, fijando así un criterio conservador.

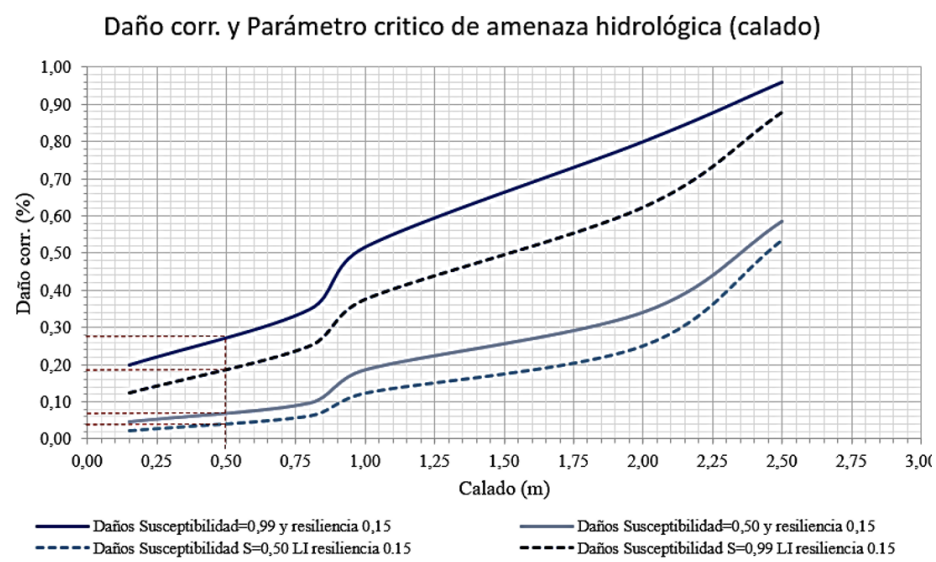


Figura 13. Gráfica de análisis del calado, Y , y del daño, I_D corr. según metodología propuesta. Valores límite de daño para $S_i=0,99$ y $0,50$; $\alpha=0,15$. Fuente: elaboración propia.

Como se observa al considerar dicho producto ($Y \cdot V$) se obtienen valores de daño superiores a los obtenidos considerando únicamente el parámetro calado Y .

| Susceptibilidad, S_i (0-1) | Daño $I_{Dcorr.}$ (%) | |
|---|-----------------------|----------------------|
| Valor Límite Superior (LS) Intervalo ($0,50 < S_i \leq 0,99$) | Límite Superior (LS) | Límite Inferior (LI) |
| 0,99 | 35 | 25 |
| Valor Límite Inferior (LI) Intervalo ($0 \leq S_i \leq 0,50$) | Límite Superior (LS) | Límite Inferior (LI) |
| 0,50 | 10 | 6 |
| Resiliencia inicial, α (0-1) | 0,15 | |

Tabla 5. Intervalos de valores límite de susceptibilidad S_i , resiliencia α y daño I_D . Fuente: elaboración propia.

En la siguiente Figura 12, se obtiene para el producto del calado por la velocidad 0,50 m²/s, una resiliencia mínima $\alpha=0,15$, y diferentes niveles de susceptibilidad, S , unos rangos de daño variables 6%-10%, y 25%-35% según límites de susceptibilidad (0,50 y 0,99).

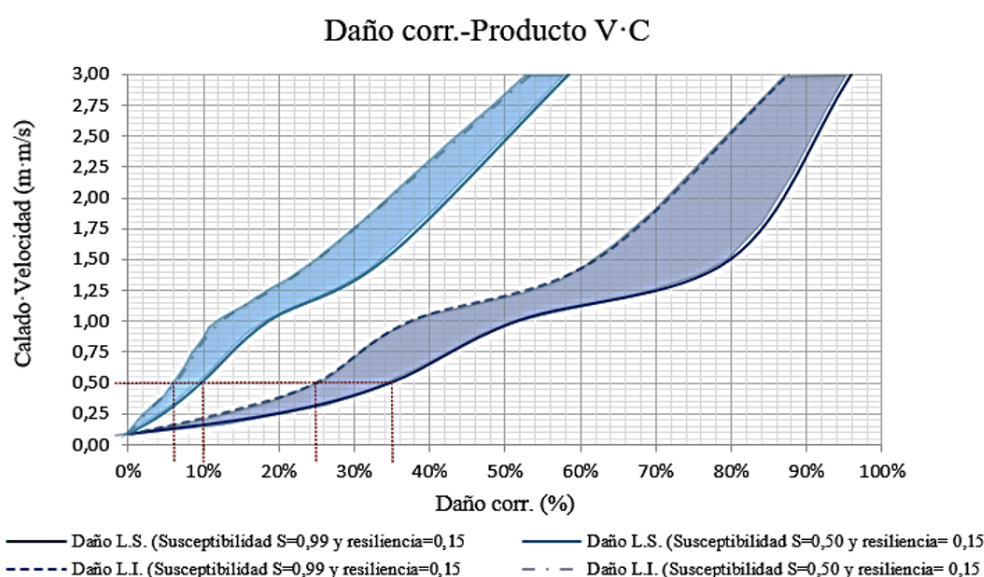


Figura 14. Gráfica de análisis de producto calado Y y velocidad V , de valor 0,50 y valores de daño según intervalos de límites superior e inferior para $S_i=0,99$ y 0,50; $\alpha=0,15$. Fuente: elaboración propia.

De otra parte, a partir de los valores de calado $Y=0,50$ m y $Y \cdot V=0,50$ m²/s correspondiente al nivel 4 de peligrosidad hidrológica según la tabla 3, y un valor propuesto de daño estimado $I_D=14\%$ se obtienen los posibles valores de la amenaza hidrológica.

| Susceptibilidad, S_i (0-1) | Amenaza Hidrológica (I_{AH}) | |
|---|----------------------------------|----------------------|
| Valor Límite Superior (LS) Intervalo ($0,50 < S_i \leq 0,99$) | Límite Superior (LS) | Límite Inferior (LI) |
| 0,99 | 0,20 | 0,32 |
| Valor Límite Inferior (LI) Intervalo ($0 \leq S_i \leq 0,50$) | Límite Superior (LS) | Límite Inferior (LI) |
| 0,50 | 0,52 | 0,63 |
| Resiliencia inicial, α (0-1) | 0,15 | |

Tabla 6. Intervalos de valores límite de susceptibilidad S_i , resiliencia α y daño I_D .

Comparativamente con la metodología PATRICOVA, los valores obtenidos varían sensiblemente según los valores de susceptibilidad y resiliencia estimados. El valor de daño del 14% correspondería entonces a un valor de susceptibilidad $0,50 < S_i < 0,99$. En este caso, dado que estaríamos en el nivel 4 de amenaza hidrológica donde la misma varía según el intervalo (44-30) seleccionamos el valor de amenaza 0,32 o 32. Seleccionando dicho valor de amenaza obtenida, en la siguiente gráfica, figura 3 se delimitan los valores de daño según los límites establecidos.

| Susceptibilidad, S_i (0-1) | Daño I_D corr. (%) | |
|---|----------------------|----------------------|
| Valor Límite Superior (LS) Intervalo ($0,50 < S_i \leq 0,99$) | Límite Superior (LS) | Límite Inferior (LI) |
| 0,99 | 22 | 14 |
| Valor Límite Inferior (LI) Intervalo ($0 \leq S_i \leq 0,50$) | Límite Superior (LS) | Límite Inferior (LI) |
| 0,50 | 5 | 2,5 |
| Resiliencia inicial, α (0-1) | 0,15 | |

Tabla 7. Intervalos de valores límite de susceptibilidad S_i , resiliencia α y daño I_D .
Fuente: elaboración propia.

Daño corr.-Amenaza Hidrológica

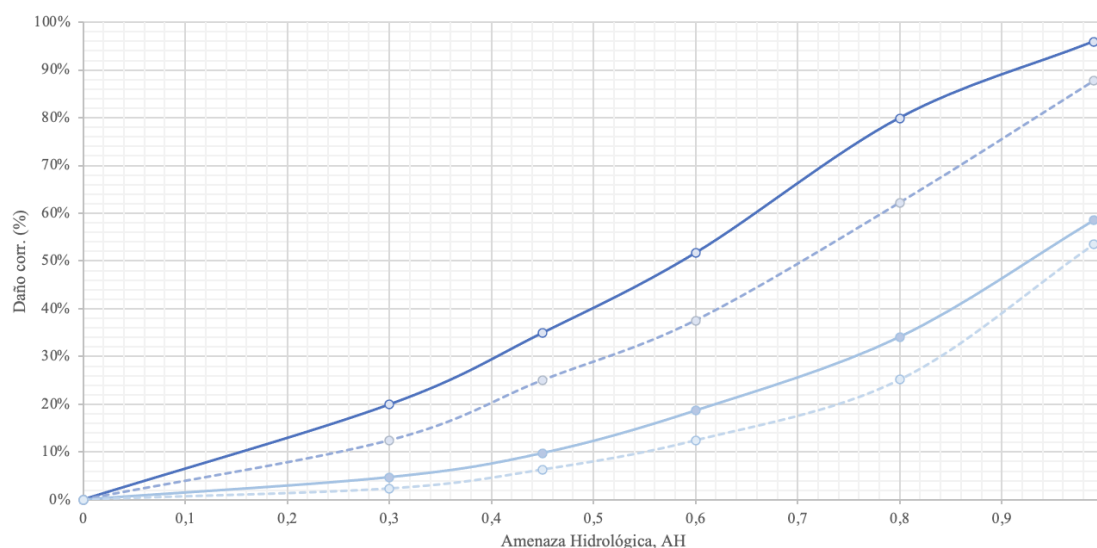


Figura 15. Gráfica de daños y amenaza hidrológica. Intervalos, límites y valores de susceptibilidad y resiliencia.
Fuente: elaboración propia.

Se observa que para un nivel de amenaza 4 (32), valores de susceptibilidad $0,50 < S_i \leq 0,99$ y resiliencia $0 \leq \alpha \leq 0,15$, el valor del daño obtenido (límite inferior, LI) coincide con el obtenido en la gráfica figura 1, de 14%.

Para el índice de amenaza obtenido se obtiene un valor de la amenaza de 0,45 según la siguiente tabla. Dicho valor de la amenaza hidrológica podría estar afectado por diversos factores de amenaza locales, aunque en este caso no se van a considerar.

Considerando los diferentes niveles de resiliencia para una susceptibilidad $0,50 < S_i \leq 0,99$, los daños estimados serán los que se indican en la siguiente tabla, según la metodología planteada, observándose que dichos daños encuadrarían para una susceptibilidad entre $S_i = 0,501$ y

Si=0,550. Homogeneizando valores de susceptibilidad, Si y resiliencia, α , y aplicando la formulación de riesgo, R, se obtendría que el mismo varía entre $R_H=0,17$ y $R_H=0,19$ respectivamente.

| Indicador de resiliencia Hidrológica corregido ($I_{\alpha Hc}$) | | | | | | |
|--|--|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Rangos Indicadores resiliencia | Indicador resiliencia máxima ($I_{\alpha máx.}$) | Rango de Amenaza Hidrológica | | | | |
| | | $r_{1AH} < 0,30$ | $0,30 \leq r_{2AH} \leq 0,45$ | $0,45 < r_{3AH} \leq 0,60$ | $0,60 < r_{4AH} \leq 0,80$ | $0,80 < r_{5AH} \leq 0,99$ |
| | | $I_{Ahmáx.} = 0,299$ | $I_{Ahmáx.} = 0,45$ | $I_{Ahmáx.} = 0,60$ | $I_{Ahmáx.} = 0,80$ | $I_{Ahmáx.} = 0,999$ |
| $0 \leq r_{1\alpha} \leq 0,15$ | 0,15 | 0,150 | 0,129 | 0,116 | 0,099 | 0,082 |

Tabla 8. Valores de resiliencia α , y rangos de amenaza hidrológica y de resiliencia, para un rango de susceptibilidad $0,50 < Si \leq 0,99$. Fuente: elaboración propia.

$$R_H = A_H \cdot V_H = A_H \cdot \frac{Sh/\alpha h}{10} = 0,45 \cdot \frac{\left(\frac{0,501}{0,501+0,129}\right) / \left(\frac{0,129}{0,129+0,501}\right)}{10} = 0,45 \cdot \frac{0,80/0,20}{10} = 0,1748$$

para S inicial=0,501

$$R_H = A_H \cdot V_H = A_H \cdot \frac{Sh/\alpha h}{10} = 0,45 \cdot \frac{\left(\frac{0,550}{0,550+0,129}\right) / \left(\frac{0,129}{0,129+0,550}\right)}{10} = 0,45 \cdot \frac{0,81/0,19}{10} = 0,1919$$

para S inicial=0,550

| Resiliencia hidrológica | Limites | Amenaza hidrológica Nivel 4 (44-30) | |
|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | | $0,30 \leq r_{2AH} \leq 0,45$ | $0,30 \leq r_{2AH} \leq 0,45$ |
| | | Si=0,501 | Si=0,550 |
| $0 \leq r_{1\alpha} \leq 0,15$ | Intervalo valor superior | 17,46% | 19,17% |
| | Intervalo valor medio | 14,99% | 16,46% |
| | Intervalo valor inferior | 12,52% | 13,75% |

Tabla 9. Daños para una amenaza hidrológica de nivel 4, Susceptibilidad Si (0,500-0,550) y resiliencia $\alpha \leq 0,15$. Fuente: elaboración propia.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Seguidamente en base al análisis realizado se observa la variación (límites superior e inferior) del riesgo y el daño potencial según el nivel de amenaza, y los rangos del índice de susceptibilidad considerado ($0 \leq \text{Simáx.} \leq 0,50$ y $0,50 < \text{Simáx.} \leq 0,99$) (Figura 14).

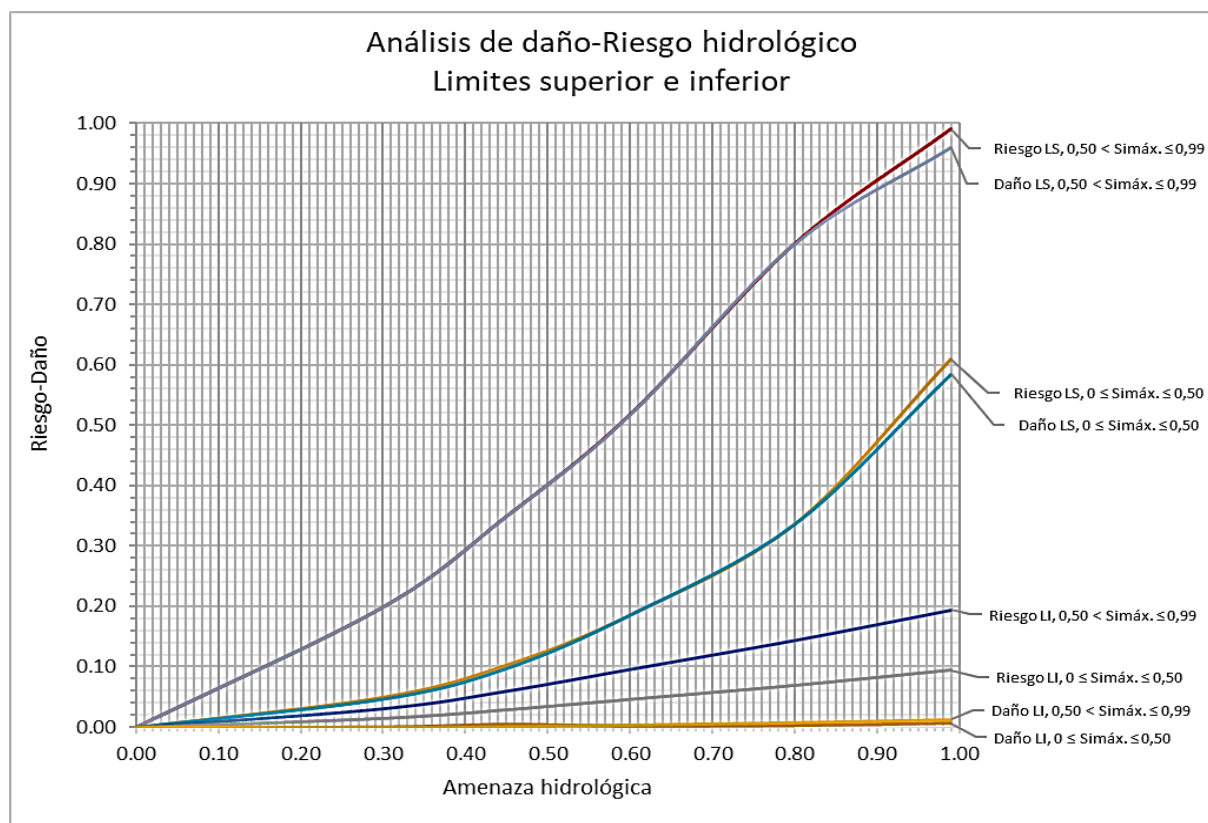


Figura 16. Evolución del riesgo y el daño potencia, según rangos y límites máximo y mínimo, considerando igualmente los rangos de variación de la susceptibilidad S_i , ($0 \leq \text{Simáx.} \leq 0,50$ y $0,50 < \text{Simáx.} \leq 0,99$), según nivel de amenaza hidrológica. Fuente: elaboración propia.

Según el desarrollo analítico realizado respecto a los componentes del riesgo y en concreto el coeficiente λ estimado, este varía según rango variable con la amenaza y el nivel de susceptibilidad y el grado de resiliencia, considerando además unos factores externos al sistema también variables y que evolucionan según una función matemática del tipo indicado en las gráficas siguientes (Figuras 15 y 16), y que se concreta en un coeficiente lambda " λ ".

En relación con la variabilidad del coeficiente λ , variable dependiente de factores externos al Sistema de Infraestructuras hidráulicas, se indica la variabilidad (límites superior e inferior) según el nivel de amenaza, un riesgo $R=0,99$ y un índice de susceptibilidad $> 0,50$. Rango de resiliencia, α (0,15 y 0,99).

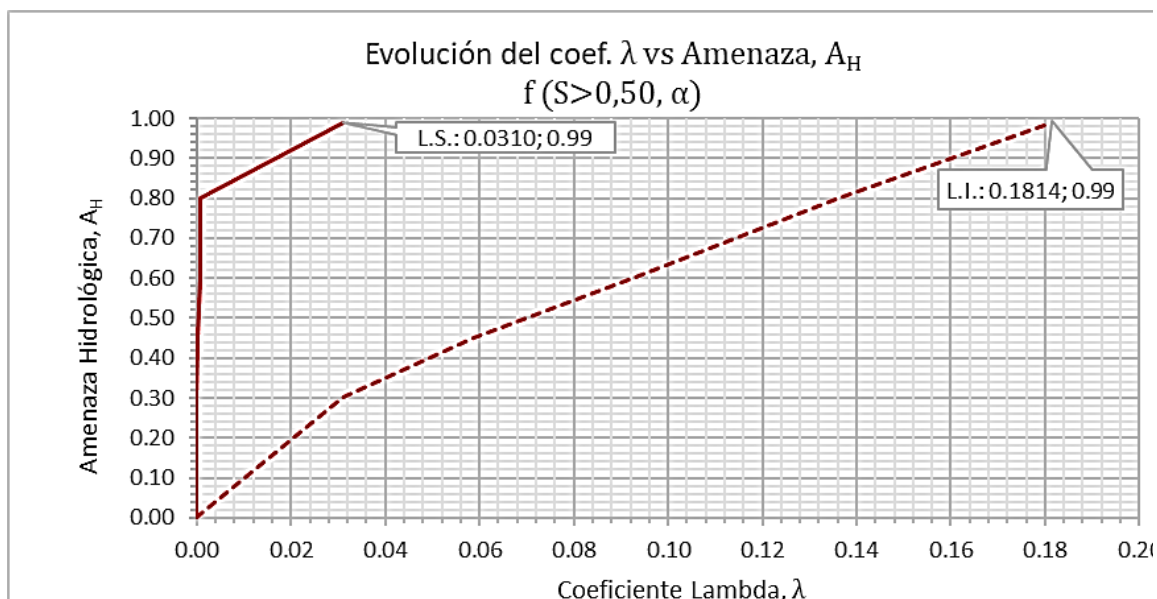


Figura 17. Análisis de la variación de los límites de riesgo y de daño, así como de la susceptibilidad, según nivel de amenaza hidrológica. Fuente: elaboración propia.

En el caso de un índice de susceptibilidad, $S_i \leq 0,50$, la gráfica de los límites superior e inferior anteriormente indicada, sería según la Figura 7, siguiente.

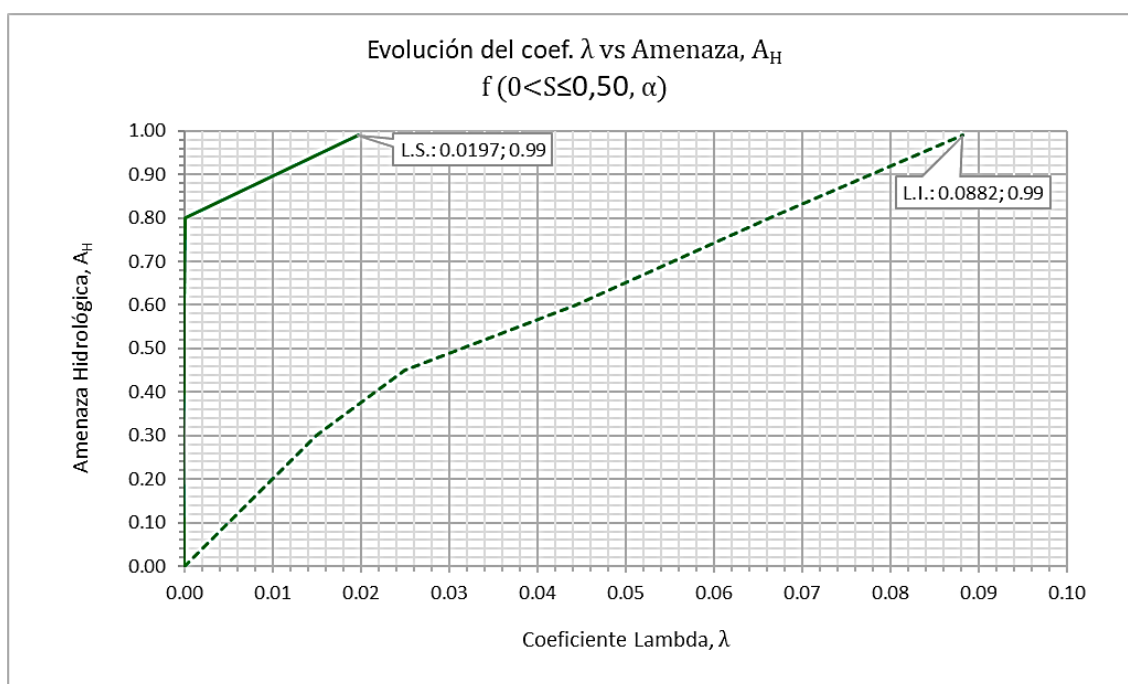


Figura 18. Análisis de la variación de los límites de riesgo y de daño, así como de la susceptibilidad, $S_i \leq 0,50$, según nivel de amenaza hidrológica. Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, este objetivo planteado también se ha cumplido, obteniendo las funciones de distribución que definen la probabilidad de daño en relación con la vulnerabilidad obtenida de la infraestructura hidráulica. Este planteamiento, permitiría integrar la información representativa del sistema, en una plataforma GIS, estableciendo escenarios de riesgo potencial, y desarrollar la resiliencia de este, base para la definición de planes de gestión de riesgos.

6. CONCLUSIONES

Se concluye que el análisis realizado puede aportar una mejora al análisis de la vulnerabilidad de las infraestructuras hidráulicas, disponiendo para ello de una metodología abierta de carácter holístico basada en la construcción de indicadores que de manera rápida permite disponer de información en tiempo real de las posibles consecuencias (daños) que tendría en una determinada infraestructura el impacto de un episodio de inundación, bien de manera analítica como gráfica. El mayor conocimiento y la vinculación de todos los componentes esenciales del riesgo, permite desarrollar e implantar medidas y actuaciones tendentes a incrementar la capacidad de adaptación y de respuesta de un Sistema de Infraestructuras, en este caso hidráulicas urbanas.

La propuesta metodología al revestir un carácter holístico y vinculado permite su implantación a todas las infraestructuras críticas y servicios esenciales, permitiendo una planificación más fácil de las acciones de adaptación al cambio climático, así como de una mejor y más rápida toma de decisiones. Establece una guía para la caracterización de la infraestructura conceptualizando previamente las variables que intervienen y que definen a la misma, permitiendo ajustar los indicadores a la evolución temporal, estableciéndose para ello las siguientes etapas:

- Caracterización y análisis de variables, parámetros físicos y operacionales.
- Análisis de la información histórica de gestión de la infraestructura hidráulica.
- Integración de variables y construcción de indicadores representativos.
- Definición del nivel de gestión del sistema de infraestructuras hidráulicas.
- Localización, caracterización y selección de puntos críticos del sistema.
- Definición de alternativas de eficiencia operativa, continuidad del servicio y aplicación de medidas de mitigación del riesgo.
- Análisis de la evolución de indicadores de gestión y medidas correctoras.
- Desarrollo e implantación de un plan de gestión de riesgos de la infraestructura hidráulica urbana (incluyendo los diferentes planes operativos y de emergencia específicos).

Así mismo, la metodología de seguimiento de la gestión de riesgos de la infraestructura hidráulica permite analizar la evolución de los parámetros esenciales, así como las variables representativas, lo que mejora la gestión y el ajuste de estos en un horizonte temporal, incrementando la resiliencia del sistema.

REFERENCIAS

- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387-401. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Barbat, A. H., & Cardona, O. D. (2003). *Vulnerability and disaster risk indices from engineering perspective and holistic approach to consider hard and soft variables at urban level*. Information and indicators program for disaster risk management. Universidad Nacional de Colombia.
- Birkmann, J. (2006). *Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies*. United Nations University Press.
- Cardona, O. D. (2004). The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management. In:

Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People.

- Cardona, O. D. (2006). *A System of Indicators for Disaster Risk Management in the Americas in Measuring Vulnerability to Hazards of Natural Origin: Towards Disaster Resilient Societies*. United Nations University Press.
- Cardona, O., Hurtado, E. J., Duque, G., Moreno, A., Chardon, A., & Velásquez, S. (2004). *Dimensionamiento relativo del riesgo y de la gestión: Metodología utilizando indicadores a nivel nacional*. Programa BID/IDEA de Indicadores para la Gestión de Riesgos, Universidad Nacional de Colombia. <http://idea.unalmz.edu.co>
- Carreño, M. O. (2005). *Sistema de Indicadores para la Evaluación de Riesgos*. Monografía CIMNE IS-52, Technical University of Catalonia. Barcelona (Spain).
- Carreño, M. O. (2007b). A disaster risk management performance index. *Journal of Natural Hazards*, 41(1), 1-20.
- DELNET-ONU. (2009). *Programa Delnet, la reconstrucción Postdesastre: una oportunidad para avanzar hacia el desarrollo sostenible*. Centro Internacional de Formación de la OIT.
- *Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2007 relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.*
- Egea, R. (2018). *Investigación sobre modelos de gestión de infraestructuras hidráulicas urbanas resilientes en relación con los riesgos hidrológicos y geológicos*. Tesis doctoral. Universitat d'Alacant.
- Egea, R., Trapote, A., & Melgarejo, J. (2018). Desarrollo metodológico para una gestión resiliente de la seguridad de las infraestructuras hidráulicas urbanas críticas. En: *Congreso Nacional del Agua Orihuela: Innovación y Sostenibilidad* (pp. 1525-1538). Universitat d'Alacant.
- Escuder Bueno, I., Castillo Rodríguez, J. T., Morales Torres, A., & Altarejos García, L. (2013). *Metodología completa y cuantitativa de análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas*. Editorial Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/70681>
- FEMA (2003). *Multi-hazard loss estimation methodology, flood model, HAZUS, technical manual*. Department of Homeland Security, Emergency Preparedness and Response Directorate, FEMA, Mitigation Division, Washington, D.C., under a contract with the National Institute of Building Sciences.
- FEMA-HAZUS (2004). *HAZUS-MH MR2 Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency.
- Generalitat Valenciana (2015). *PATRICOVA: Plan de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana*.
- Gerl, T., Kreibich, H., Franco, G., Marechal, D., & Schröter, K. (2016) A Review of Flood Loss Models as Basis for Harmonization and Benchmarking. *PLoS ONE*, 11(7), e0159791. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159791>
- Gracia, A., Godé, L. Crego, E., Arrabal, M. A., Guirado, V., García, G., Lobera, C., González, S., & Martínez, E. (2010, 27-28 de octubre). Riesgos y cuantificación de daños por inundación. En: *5º Congreso Internacional Ordenamiento do Território Desenvolvimento Sustentible y Gestión de Recursos Hídricos*.
- Hammond, M. J., Chen, A. S., Djordjević, S., Butler, D., & Mark, O. (2015) Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, 12(1), 14-29. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.857421>
- Hernández-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H., & Ramírez, A. I. (junio, 2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VIII, 30(3), 5-25. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-01>
- IDEA (2005). *Indicadores para la Gestión de Riesgos, Operación BID ATN/JF-7907-RG*.

- Universidad Nacional de Colombia, Manizales. <http://idea.unalmzl.edu.co>
- ISDR-ONU. (2000). *Disaster Prevention, Education and Youth. The specific case of wild-fires*.
 - Martínez-Gomariz, E., Forero-Ortiz, E., Guerrero-Hidalga, M., Castán, S., & Gómez, M. (2020). Flood Depth–Damage Curves for Spanish Urban Areas. *Sustainability*, 12, 2666. <https://doi.org/10.3390/su12072666>
 - Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thielen, A. (2010). Assessment of economic flood damage. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1697–1724, <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
 - Ministerio para la Transición Ecológica, MITECO (2017). *Guía para la reducción de la vulnerabilidad de Edificios frente a Inundaciones*. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/guia_inundaciones_completa_22jun_tcm30-526164.pdf
 - Ministerio para la Transición Ecológica, MITECO (2019). *Guía de Evaluación de la Resiliencia de los núcleos urbanos frente al riesgo de Inundación: redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras*. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/guia-evaluacion-resiliencia-nucleos-urbanos-riesgo-inundacion_tcm30-503725.pdf
 - Ministerio para la Transición Ecológica, MITECO (2019). *Guía de Adaptación al riesgo de inundación de explotaciones agrícolas y ganaderas*. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/guia-adaptacion-al-riesgo-inundacion-explotaciones-agricolas-ganaderas_tcm30-503727.pdf
 - Ministerio para la Transición Ecológica, MITECO (2019). *Recomendaciones para la construcción y rehabilitación de edificaciones en zonas inundables*. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/guia-recomendaciones-construccion-y-rehabilitacion-edificaciones-zonas-inundables_tcm30-503724.pdf
 - Ministerio para la Transición Ecológica, MITECO (2019). *Sistemas urbanos de drenaje Sostenible*. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/guia-adaptacion-riesgo-inundacion-sistemas-urbano-drenaje-sostenible_tcm30-503726.pdf
 - Ministerio para la Transición Ecológica, MITECO (2019). *Buenas prácticas en actuaciones de conservación, mantenimiento y mejora de cauces*. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/guia-buenas-practicas-en-actuaciones-conservacion-mantenimiento-mejora-cauces_tcm30-503733.pdf
 - Osés-Eraso, N., & Foudi, S. (2020). *Valoración de riesgos por inundaciones*. Documento de Trabajo, 08.
 - PAHO, OPS. (1998). Mitigación de desastres naturales en sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario - Guías para el análisis de vulnerabilidad. Pan American Health Organization (PAHO) / Organización Panamericana de la Salud (OPS).
 - Pinos, J., Timbe, L., & Orellana, D. (2017). Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fluvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para Ecuador. *Maskana*, 8(2), 147–162. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.02.11>
 - Russo, B., Gómez, M., Macchione, F., & de Recerca FLUMEN, G. (2011). *Criterios de peligrosidad en medio urbano*. Estudio comparativo entre referencias nacionales e internacionales Tema C (Agua y ciudad).
 - Serrano-Lombillo, A., Escuder-Bueno, I., de Membrillera-Ortuño, M. G., & Altarejos-García, L. (2011). Methodology for the calculation of annualized incremental risks in systems of dams. *Risk Analysis*, 31(6), 1000-1015. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01547.x>
 - Ten Veldhuis, J. A. E. (2011) How the choice of flood damage metrics influences urban flood risk assessment. *Journal of Flood Risk Management*, 4 (4), 281–287.

- Yu, J. Z., Whitman, M., Kermanshah, A. H., & Baroud, H. (2021) A hierarchical Bayesian approach for assessing infrastructure networks serviceability under uncertainty: A case study of water distribution systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 215, 107735. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107735>