



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

INSTITUTO UNIVERSITARIO DEL AGUA Y DE LAS CIENCIAS AMBIENTALES (IUACA)
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE

**INVESTIGACIÓN SOBRE MODELOS DE GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURAS HIDRAULICAS
URBANAS RESILIENTES EN RELACIÓN CON LOS RIESGOS HIDROLÓGICOS Y GEOLÓGICOS**



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

RAMÓN EGEA PÉREZ

**Tesis presentada para aspirar al grado de
DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE**

MENCIÓN DE DOCTOR INTERNACIONAL

**DOCTORADO EN AGUA Y DESARROLLO SOSTENIBLE (UA) Y DOCTORADO EN CIENCIAS,
MENCIÓN GEOLOGÍA (UCH)**

Julio 2018

Dirigida por:

DR. ARTURO TRAPOTE JAUME, Universidad de Alicante
DR. JAMES PETER MCPHEE TORRES, Universidad de Chile

Resumen

El objetivo fundamental de la presente investigación es desarrollar un modelo metodológico de gestión de las infraestructuras hidráulicas urbanas con relación a los riesgos hidrológicos y geológicos caracterizados. Para ello, se han caracterizado y analizado la susceptibilidad y la resiliencia de los diferentes componentes, sistemas y subsistemas de este, así como la afectación sobrevenida de las amenazas naturales de carácter hidrológico y geológico incluidas en la investigación, en el ámbito local o zona de estudio y de implantación.

Se pretende integrar la información del sistema de infraestructuras hidráulicas urbanas, con la información temática relativa a los riesgos analizados, a través de un Sistema de Información Geográfica compatible, generando posibles escenarios en base a las características de peligrosidad de la zona de análisis y el grado de vulnerabilidad o fiabilidad del sistema hidráulico, al objeto de obtener una herramienta de gestión de la infraestructura hidráulica urbana que posibilitará un modelo de gestión integral y sostenible de la misma.

Dicha metodología servirá como herramienta de toma de decisiones al operador del sistema, y de planificación e información a los diferentes organismos competentes de la Administración Pública. Además de otras actividades, el planeamiento urbanístico y la prevención o mitigación de los efectos durante los eventos catastróficos, se beneficiarán de ello, ya que los organismos gestores de estas áreas de responsabilidad podrían disponer de una herramienta de consulta que permitiera un análisis en tiempo real.

Con el fin de homogeneizar la aplicación de la metodología propuesta se proponen los inputs básicos que definirán el sistema en su conjunto, para obtener los outputs que harán eficiente la gestión integral a través del modelo propuesto.

La definición de los diferentes parámetros integrados y su interrelación analítica, conlleva la obtención de un modelo actualizado en tiempo real, que permitirá prever las posibles incidencias en el sistema, la localización de los puntos y/o subsistemas más críticos, con las alternativas posibles, según el escenario

real y su variación temporal, y sentar con ello las bases del modelo de gestión integral del sistema hidráulico urbano, ante los más importantes riesgos hidrológicos y geológicos característicos de la zona de análisis.

La implantación del modelo no se circunscribe a unas zonas determinadas, sino que es un modelo de gestión que unifica e integra todos los parámetros y variables necesarias que caracterizan el Sistema, para prever y mitigar los posibles efectos catastróficos (pérdidas de vidas humanas, daños sobre las infraestructuras básicas,...) ya que plantea modelos de escenarios posibles, que se alimentan y actualizan en tiempo real con la información disponible, sirviendo así como herramienta de toma de decisiones, y como elemento fiable que garantiza la operatividad de este sistema esencial y vital, para las personas y las actividades humanas en general. Se trata de implantar y desarrollar la resiliencia en las infraestructuras hidráulicas urbanas, proponiendo nuevos diseños de componentes, mediante la incorporación de equipamientos y dispositivos que por sus características funcionales incrementen la fiabilidad operativa del sistema, en el caso de eventos catastróficos hidrológicos y geológicos.

Dada la amplitud y las posibilidades de desarrollo de la temática descrita, se ha optado por plantear unas directrices generales para la implantación del modelo de gestión, a partir de la descripción de los componentes del sistema hidráulico urbano, caracterizando los mismos según las variables y parámetros característicos del sistema, con una visión integral y homogénea, que haga posible su implantación independientemente de la zona geográfica y la diversa tipología operativa del sistema hidráulico urbano.

Además, se concretan unas estrategias o recomendaciones sobre el empleo de materiales sostenibles, adaptando su utilización a la diversa tipología estructural de la infraestructura hidráulica particular, sobre todo en aquellos elementos de la red especialmente sensibles y críticos del sistema. Finalmente, se propone la instalación de dispositivos de detección, medición y control, de equipos y de dispositivos que permite conocer y actuar sobre el comportamiento de las estructuras hidráulicas en tiempo real, lo que permite la operación sostenible e inteligente de las mismas, anticipándose así, al evento catastrófico en un tiempo “razonable” y ejercer una toma de decisiones más objetiva, en eventuales situaciones de riesgo sísmico, e inundación, o de sus riesgos derivados.

Con un enfoque de minimización de los efectos negativos que pueden acarrear estos eventos catastróficos descritos (deslizamientos de tierras, inundaciones, terremotos, episodios de lluvias intensas, erupciones volcánicas, y afecciones al medio ambiente en general), se realiza un primer análisis de estimación de daños y las posibles alternativas para la toma de decisiones en un marco integral, que permita garantizar la continuidad de este servicio básico, y evitar o minimizar las consecuencias adversas de eventos catastróficos o incidencias imprevistas.

Mediante el desarrollo de este modelo de gestión integral, que resulta especialmente útil, además de como instrumento de planificación urbana y como base de información a los servicios de protección civil, para la mitigación de daños y control del riesgo en las infraestructuras hidráulicas urbanas, se incrementa la resiliencia, y la gestión eficiente de la infraestructura hidráulica urbana, adaptando la

misma a los efectos del cambio climático y su incidencia en la mayor variabilidad de los riesgos naturales. Es por ello, un modelo de gestión sostenible que, a partir de un análisis de las amenazas o peligro potencial, plantea una caracterización homogénea e integral del sistema hidráulico urbano, analizando la vulnerabilidad de los componentes esenciales del mismo, su grado de riesgo y la fiabilidad de la infraestructura en su conjunto, desde una visión integrada, y a partir de una caracterización física y operativa de aquella.

Abstract

The main objective of the present investigation is to develop a methodological model of management of urban hydraulic infrastructures in relation to the hydrological and geological risks characterized. To this end, the susceptibility and resilience of the different components, systems and subsystems of this have been characterized and analyzed, as well as the affected impact of natural hazards of a hydrological and geological nature included within the research, in the local area or study and implementation.

It is intended to integrate the information of the urban hydraulic infrastructure system, with the thematic information related to the analyzed risks, through a compatible Geographic Information System, generating possible scenarios based on the hazard characteristics of the area of analysis and the degree of vulnerability or reliability of the hydraulic system, in order to obtain a tool for managing the urban hydraulic infrastructure that will enable a model of integral and sustainable management of it.

This methodology will serve as a decision-making tool for the system operator, and for planning and information to the different competent bodies of the Public Administration. In addition to other activities, urban planning and the prevention or mitigation of effects during catastrophic events, will benefit from this, since the managing bodies of these areas of responsibility could have a consultation tool that would allow a real-time analysis.

In order, to homogenize the application of the proposed methodology, the basic inputs that will define the system as a whole are proposed, in order to obtain the outputs that will make integral management efficient through the proposed model.

The definition of the different integrated parameters and their analytical interrelation, leads to the obtaining of an updated model in real time, which will allow to foresee the possible incidents in the system, the location of the most critical points and / or subsystems, with the possible alternatives, according to the real scenario and its temporal variation, and thus lay the foundations of the integral management model of the urban hydraulic system, before the most important hydro geological risks characteristic of the area of analysis.

The implementation of the model is not limited to certain areas, but is a management model that unifies and integrates all the necessary parameters and variables that characterize the System, to predict and

mitigate the possible catastrophic effects (loss to human life, damage to the basic infrastructures, ...) since it raises models of possible scenarios, which are fed and updated in real time with the available information, serving as a decision-making tool, and as a reliable element that guarantees the operation of this essential system and vital, for people and human activities in general. The aim is to implement and develop resilience in urban hydraulic infrastructures, proposing new component designs, through the incorporation of equipment and devices that, due to their functional characteristics, increase the operational reliability to the system, in the case of hydrological and geological catastrophic events.

Given the breadth and possibilities of development of the subject described, it has been decided to propose general guidelines for the implementation of the management model, from the description of the components of the urban hydraulic system, characterizing them according to the variables and parameters characteristics of the system, with a comprehensive and homogeneous vision, which makes possible its implementation independently of the geographical area and the different operational typology of the urban hydraulic system. In addition, strategies or recommendations on the use of sustainable materials are specified, adapting their use to the different structural typology of the particular hydraulic infrastructure, especially in those elements of the network that are especially sensitive and critical for the system. Finally, it is proposed the installation of detection, measurement and control devices, equipment and devices that allow to know and act on the behavior of hydraulic structures in real time, which allows the sustainable and intelligent operation of them, anticipating this way, to the catastrophic event in a "reasonable" time and to exercise a more objective decision making, in eventual situations of seismic risk, and flood, or of its derived risks.

With a focus on minimizing the negative effects that these described catastrophic events can cause (landslides, floods, earthquakes, episodes of heavy rains, volcanic eruptions, and environmental problems in general), a first estimation analysis is carried out. damages and possible alternatives for decision-making in an integral framework, which allows to guarantee the continuity of this basic service, and to avoid or minimize the adverse consequences of catastrophic events or unforeseen incidents. Through the development of this integral management model, which is especially useful, as well as an urban planning instrument and as an information base for civil protection services, for damage mitigation and risk control in urban hydraulic infrastructures, it increases the resilience, and the efficient management of the urban hydraulic infrastructure, adapting it to the effects of climate change and its incidence in the greater variability of natural risks. It is for this reason, a sustainable management model that, based upon an analysis of the threats or potential danger, proposes a homogeneous and integral characterization of the urban hydraulic system, analyzing the vulnerability of its essential components, its degree of risk and the reliability of the infrastructure as a whole, from an integrated vision, and from a physical and operational characterization of the one

Agradecimientos

La tesis desarrollada, es el resultado de una integración de conocimientos y una gran ilusión por desmenuzar aquellos aspectos algunas veces poco conocidos y que generan inquietud ante las amenazas “incontrolables” por definición, que generan una gran dosis de inquietud, pero que es posible mitigar sus efectos adversos, en este caso sobre las Infraestructuras Hidráulicas Urbanas.

El planteamiento inicial de la temática finalmente investigada tuvo su origen en la preocupación por la eficiencia operativa y de gestión de la Infraestructura hidráulica en general, y los abastecimientos urbanos en particular. Fue en los inicios del año 2012, cuando surgió la preocupación sistemática por todos aquellos aspectos que concernían mi labor profesional, adentrándome muchas veces en “territorio” poco conocido por mí, pero que con constancia y voluntad fui descubriendo, y analizando, intentando comprender con la inestimable ayuda de colaboradores, profesores, y amigos, que me han ofrecido su conocimiento y sugerencias para llevar a cabo esta investigación de la cual se han obtenido ya algunos resultados prácticos, aunque preliminares.

A mis compañeros de la Universidad de Alicante, los profesores Arturo Trapote por su ánimo y apoyo constante, Joaquín Melgarejo por despertar mi interés en este complejo mundo de la economía del agua, José Antonio Martín por su paciencia, Miguel Ángel Climent por su gran ayuda en el conocimiento en la durabilidad de materiales, Salvador Ivorra por su amistad, y en general a todos mis profesores del Departamento de Ingeniería Civil. Y por supuesto, a mi estimado profesor James P. McPHEE, por su apoyo siempre, su buen humor y talante, y a los profesores Jaime Campos, Enrique López, Gabriel Vargas, y José Vargas.

Un recuerdo también para Cetaqua-Chile y Aguas Andinas, que comprendieron el desarrollo y el potencial de esta investigación metodológica, y sus excelentes profesionales que con su inestimable colaboración y ayuda pude ir encajando “todo este rompecabezas”.

Y, por último, y no menos importante a mis compañeros de EMUASA, por su extraordinaria labor profesional, apoyo incondicional, y excelente acogida en todo lo relacionado con ésta y otras investigaciones.

Quede constancia de mi más sincero agradecimiento, a mi familia en primer lugar, por su incondicional apoyo y esfuerzo en esta labor, pues han reconocido sin duda la importancia que para mí suponía alcanzar este hito, que hace unos pocos años ni me planteaba.

A mis padres, que siempre han estado y estarán conmigo, y que en este momento se sentirían muy felices y orgullosos. ¡Os tendré siempre en mi corazón!

Es mi esperanza, que esta tesis contribuya al menos a visualizar algo más de ese camino tortuoso y las más de las veces desagradecido, que supone la investigación en general, que en este mi caso, ha resultado ser un desafío inesperado.

Índice

1. Introducción	29
1.1. Justificación de la investigación.....	29
1.2. Objetivos y alcances	31
1.2.1. Objetivos.....	31
1.2.2. Alcances	32
1.3. Antecedentes de las zonas de estudio.....	33
2. Revisión de metodologías de análisis de riesgo de infraestructuras	39
2.1. Revisión de conceptos.....	39
2.2. Revisión de metodologías	40
2.2.1. Modelos de análisis selectivo o parcial del riesgo	40
2.2.2. Modelos de análisis de carácter holístico del riesgo	43
2.2.3. Selección de metodologías base	44
3. Metodología de evaluación de riesgo de la infraestructura hidráulica	46
3.1. Definiciones.....	46
3.2. Metodología.....	48
3.3. Análisis de amenazas	60
3.3.1. Amenazas Extrínsecas.....	60
3.3.1.1. Amenaza Hidrológica.....	61
3.3.1.2. Amenaza Geológica	64
3.3.1.2.1. Amenaza de Remoción de masa.....	65
3.3.1.2.2. Amenaza Sísmica.....	69
3.3.1.2.3. Amenaza Volcánica	73
3.3.2. Amenazas Intrínsecas.....	77
3.3.3. Caracterización de factores de amenaza: Rangos y valores.....	78
3.4. Indicadores constitutivos de la vulnerabilidad de la Infraestructura hidráulica.....	82
3.4.1. Caracterización física y operacional de la infraestructura hidráulica	82
3.4.1.1. Sistema de Abastecimiento	82
3.4.1.2. Sistema de Saneamiento.....	84
3.4.2. Indicadores de susceptibilidad de la infraestructura hidráulica.....	86
3.4.2.1. Indicadores físicos de susceptibilidad.....	86
3.4.2.2. Indicadores operacionales de susceptibilidad.....	87
3.4.3. Indicadores de resiliencia de la infraestructura hidráulica	88
3.4.3.1. Método de cálculo de los indicadores de resiliencia <i>Iakil</i> en función de los rangos de amenaza <i>rmAk</i> y rangos de los indicadores de resiliencia <i>rnlakil</i>	90
3.4.3.1.1. Resiliencia hidrológica	90
3.4.3.1.2. Resiliencia de Remoción en Masa.....	92
3.4.3.1.3. Resiliencia Sísmica.....	94
3.4.3.1.4. Resiliencia Volcánica	96
3.4.3.2. Obtención de los valores, de los indicadores de resiliencia vinculados a la amenaza específica, según los rangos de amenaza y de resiliencia definidos.	98
3.4.3.2.1. Resiliencia hidrológica	98
3.4.3.2.2. Resiliencia de remoción en masa	100
3.4.3.2.3. Resiliencia sísmica	102
3.4.3.2.4. Resiliencia volcánica	104
3.4.3.2.5. Resumen de resiliencias específicas de amenaza	107
3.4.3.2.5.1. Resiliencia hidrológica	107
3.4.3.2.5.2. Resiliencia geológica	107
3.4.3.2.5.2.1. Resiliencia de remoción en masa.....	107
3.4.3.2.5.2.2. Resiliencia sísmica	107
3.4.3.2.5.2.3. Resiliencia volcánica	108
3.5. Indicadores de Vulnerabilidad.....	109
3.6. Indicadores de Sostenibilidad.....	111
3.7. Riesgos	117
3.7.1. Riesgo Hidrológico	117

3.7.1.1.	Riesgo hidrológico del Sistema de Abastecimiento.....	117
3.7.1.2.	Riesgo hidrológico del Sistema de Saneamiento	118
3.7.2.	Riesgo Geológico	119
3.7.2.1.	Riesgo de Remoción en masa	119
3.7.2.1.1.	Riesgo de Remoción en masa del Sistema de Abastecimiento	119
3.7.2.1.2.	Riesgo de Remoción en masa del Sistema de Saneamiento.....	120
3.7.2.2.	Riesgo Sísmico	121
3.7.2.2.1.	Riesgo Sísmico del Sistema de Abastecimiento	121
3.7.2.2.2.	Riesgo Sísmico del Sistema de Saneamiento.....	122
3.7.2.3.	Riesgo Volcánico.....	123
3.7.2.3.1.	Riesgo Volcánico del Sistema de Abastecimiento.....	123
3.7.2.3.2.	Riesgo Volcánico del Sistema de Saneamiento	124
3.7.3.	Resumen de Riesgos	125
4.	Resultados y discusión	129
4.1.	Desarrollo metodológico. Modelo inicial.....	129
4.2.	Jerarquización de indicadores	135
4.3.	Modelo final	141
4.4.	Aplicación de la Metodología	151
4.5.	Generalización y limitaciones de la metodología.....	159
5.	Casos de aplicación de la Metodología	161
5.1.	Infraestructura Hidráulica de la Ciudad de Santiago (Chile).....	161
5.2.	Infraestructura Hidráulica Urbana de la Ciudad de Murcia (España)	170
6.	Conclusiones y Recomendaciones.....	178
7.	Nuevas líneas de investigación	181
8.	Artículos generados.....	182
8.1.	Sediment load estimation in combined sewer systems located in semi-arid areas: a case study	183
8.2.	Natural risks and vulnerability management in urban water supply systems	184
8.3.	INFLUENCE OF HYDROGEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL PARAMETERS ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF POTABLE WATER INFRASTRUCTURES.....	185
8.4.	MITIGATION OF DAMAGE CAUSED TO DRINKING WATER AND SEWAGE PIPES DURING SEISMIC AND HYDROLOGICAL EPISODES	186
9.	Glosario	187
10.	Referencias	189
Anexos.....		194
Anexo 1: Esquema de desarrollo metodológico.		194
Anexo 2: Parámetros de Amenaza		197
A.2.1 Amenaza Hidrológica.....		197
A.2.1.1. Factores de amenaza hidrológica		200
A.2.2. Amenaza Geológica.		202
A.2.2.1. Amenaza de remoción en masa.....		202
A.2.2.1.1 Factores de amenaza de remoción en masa		213
A.2.2.2. Amenaza Sísmica.		215
A.2.2.2.1 Factores de amenaza sísmica.....		217
A.2.2.3. Amenaza Volcánica.....		219
A.2.2.3.1. Factores de amenaza volcánica.....		219
Anexo 3: Indicadores.....		224
A.3.1. Tablas de indicadores de Susceptibilidad. Procedimiento de análisis jerárquico (P.A.J.)		224
A.3.2. Procedimiento de análisis jerárquico (P.A.J.)		236
A.3.2.1. Fundamentos y Metodología.....		236
A.3.2.2. Aplicación.....		244
A.3.3. Esquema de construcción de indicadores		290

Anexo 4: Tipologías de mantenimiento de Redes.....	291
A.4.1. Red de abastecimiento.....	291
A.4.2. Red de alcantarillado.....	292
Anexo 5: Evolución y seguimiento de la Gestión de Riesgos	293
Anexo 6: Mapas de Amenazas	299
A.6.1. Amenaza Hidrológica.....	299
A.6.2. Amenaza de Remociones en Masa.....	301
A.6.3. Amenaza Sísmica.....	304
A.6.4. Amenaza Volcánica	305
Anexo 7: Indicadores de Susceptibilidad	307
A.7.1. Indicadores de Susceptibilidad física	307
A.7.1.1. Susceptibilidad física del sistema de abastecimiento	307
A.7.1.2. Susceptibilidad física del sistema de saneamiento.....	322
A.7.2. Indicadores de Susceptibilidad operacional	329
A.7.2.1. Susceptibilidad operacional del sistema de Abastecimiento.....	329
A.7.2.2. Susceptibilidad operacional del Sistema de Saneamiento	337
Anexo 8: Indicadores de Resiliencia	341
A.8.1. Resiliencia hidrológica.....	341
A.8.1.1. Resiliencia hidrológica del Sistema de Abastecimiento	341
A.8.1.2. Resiliencia hidrológica del Sistema de Saneamiento	350
A.8.2. Resiliencia geológica	353
A.8.2.1. Resiliencia de remoción en masa	353
A.8.2.1.1. Resiliencia de remoción en masa del Sistema de Abastecimiento	353
A.8.2.1.2. Resiliencia de remoción en masa del Sistema de Saneamiento	362
A.8.2.2. Resiliencia sísmica	366
A.8.2.2.1. Resiliencia de remoción en masa del Sistema de Abastecimiento	366
A.8.2.2.2 Resiliencia sísmica del Sistema de Saneamiento.....	376
A.8.2.3. Resiliencia volcánica	379
A.8.2.3.1 Resiliencia volcánica del Sistema de Abastecimiento	379
A.8.2.3.2 Resiliencia volcánica del Sistema de Saneamiento.....	389

Índice de Figuras

Figura 1 Distribución de precipitaciones anuales acumuladas en el área de estudio en el periodo ...	35
Figura 2 Componentes del Riesgo. Amenazas y Vulnerabilidad.....	47
Figura 3 Esquema conceptual de la metodología. Fuente: Elaboración Propia.....	48
Figura 4 Familia de Curvas de Susceptibilidad (Si). Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 5 Familia de Curvas de Resiliencia (α). Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 6 Diagrama de flujo del sistema de abastecimiento. Fuente: Elaboración Propia (2017).....	82
Figura 7 Zonas y áreas tributarias de aguas servidas. Fuente: Aguas Andinas (2013).....	84
Figura 8 Esquema de componentes y fases de operación del Sistema de Depuración.	85
Figura 9 Ejemplo de la variación esperada del daño en función del indicador de resiliencia. Fuente: Elaboración Propia.....	89
Figura 10 Resiliencia hidrológica. Función de evolución de Indicadores.	98
Figura 11 Resiliencia hidrológica. Función de evolución de Indicadores. Fuente: Elaboración propia.	100
Figura 12 Resiliencia sísmica. Función de evolución de Indicadores. Fuente: Elaboración propia. ...	102
Figura 13 Resiliencia sísmica. Función de evolución de Indicadores. Fuente: Elaboración propia. ...	104
Figura 14 Funciones de vulnerabilidad y probabilidad de daño.....	110
Figura 15 Criticidad de los componentes de la Infraestructura hidráulica en un Sistema Complejo...	126
Figura 16: Riesgos específicos. Fuente: Elaboración propia.....	127
Figura 17 Esquema de análisis de desarrollo del análisis de vulnerabilidad de la Infraestructura Hidráulica Urbana. Fuente: Elaboración propia.	130
Figura 18 Esquema de desarrollo metodológico. Modelo inicial. Fuente: Elaboración propia.	131
Figura 19 Esquema metodológico. Modelo final. Elaboración propia.....	141
Figura 20 Funciones de daño. Elaboración propia.....	149
Figura 21 Esquema de aplicación metodológica. Fuente: Elaboración propia.....	152
Figura 22 Desarrollo y aplicación de la Metodología Fase I. Fuente: Elaboración propia.....	153
Figura 23 Desarrollo y aplicación de la Metodología Fase II. Fuente: Elaboración propia.....	154
Figura 24 Desarrollo y aplicación de la Metodología Fase III. Fuente: Elaboración propia.....	155
Figura 25 Desarrollo y aplicación de la metodología Fase IV. Fuente: Elaboración propia.	156
Figura 26 Síntesis del análisis metodológico I. Fuente: Elaboración propia.	157
Figura 27 Síntesis del análisis metodológico II. Fuente: Elaboración propia.....	158
Figura 28 Zonificación de la ciudad de Santiago (Chile) y zonas limítrofes. Escala 1:250.000.	163
Figura 29. Imagen de la Ciudad de Murcia, y zonas limítrofes. Fuente: Google Earth.	170
Figura 30 Flujo de desarrollo de la obtención del Riesgo específico. Factor de riesgo. Fuente: Elaboración propia.	196
Figura 31 Amenaza hidrológica y factores de amenaza. Rangos y valores.....	201
Figura 32 Amenaza de remoción en masa y factores de amenaza. Rangos y valores. Fuente: Elaboración propia.	214
Figura 33 Zonificación sísmica Falla San Ramón. Fuente: elaboración propia.....	216
Figura 34 Amenaza Sísmica y factores de amenaza. Rangos y valores. Fuente: Elaboración propia.	218
Figura 35 Amenaza volcánica y factores de amenaza. Rangos y valores. Fuente: Elaboración propia.	220
Figura 36 Esquema de Construcción de Indicadores. Fuente: Elaboración propia.....	290

Figura 37 Niveles de desempeño e Índice de Gestión de Riesgos. Fuente: Información e Indicadores de Riesgo y Gestión de Riesgos. BID, CEPAL e IDEA, 2003-2005.	295
Figura 38 Curva de evolución del indicador de gestión y de efectividad. Fuente: elaboración propia.	295
Figura 39 Zonificación de puntos críticos de inundación en Santiago.	299
Figura 40 Área potencial de riesgo de inundación de origen fluvial y calados para un periodo de retorno T: 100años. Fuente: Sitmurcia.	300
Figura 41 Mapa Geológico Regional. (Fock A., 2005).	301
Figura 42 Imagen satelital de los Andes, Chile Central, y la Cuenca de Santiago. Quebrada de Ramón. Fuente: Contreras Vargas, M.T., (2016).	302
Figura 43 Área inundada y concentración de sedimentos. Zona Oriental de Santiago, Quebrada de Ramón. Fuente: Contreras Vargas, M.T., 2016.	302
Figura 44 Zonas de afección por flujo de detritos, en Santiago, febrero 1980.	303
Figura 45 Zonificación de la amenaza Sísmica. Falla San Ramón, en la zona Oriental de Santiago, 2018. Localización de la Infraestructura hidráulica. Fuente: Elaboración propia.	304
Figura 46 Mapa de amenaza Sísmica de la Región de Murcia para un periodo de retorno T: 475 años. Aceleraciones PGA (g) en roca. Fuente: SISIMUR 2015. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM).	304
Figura 47 Mapa de amenaza volcánica con afectación potencial de la Región Metropolitana (RM). .	305
Figura 48 Mapas de amenaza volcánica en la Región Metropolitana.	306

Índice de Tablas

Tabla 1 Registro histórico de crecidas y aluviones en la Región Metropolitana.....	33
Tabla 2 Registro histórico de alta turbiedad en el río Maipo.....	34
Tabla 3 Registro de terremotos con afectación a la ciudad de Santiago.....	34
Tabla 4 Registro histórico de mayor actividad volcánica.....	34
Tabla 5 Histórico de eventos de inundación en la Región de Murcia.....	36
Tabla 6 Histórico de terremotos de $M_s \geq 0.7$ ocurridos en el Término municipal de Murcia durante el Periodo 1933-2017.....	38
Tabla 7 Matriz normalizada de vulnerabilidad, en función de los indicadores de susceptibilidad y de resiliencia normalizada.....	51
Tabla 8 Puntaje y rango de valores de los factores de amenaza.....	53
Tabla 9 Cálculo del indicador en función de los rangos de amenaza e indicadores de resiliencia.....	57
Tabla 10 Tipología de Indicadores de Sostenibilidad de la Infraestructura hidráulica.....	58
Tabla 11 Grado de implantación de la resiliencia en la Infraestructura hidráulica.....	58
Tabla 12 Clasificación del grado de implantación de la resiliencia. Rango de valores.....	59
Tabla 13 Puntaje y rango de valores de los factores de amenaza.....	60
Tabla 14 Factores de amenaza hidrológica.....	62
Tabla 15 Factores de amenaza hidrológica. Denominación, parámetros, rangos y valores.....	62
Tabla 16 Clasificación de suelos según NCh 433.....	64
Tabla 17 Perfil geológico, denominación de suelos y propiedades geotécnicas del terreno en la ciudad de Murcia. Área metropolitana.....	65
Tabla 18 Factores de amenaza de remoción en masa.....	66
Tabla 19 Factores de remoción en masa. Denominación, parámetros, rangos y valores.....	66
Tabla 20 Factores de amenaza sísmica.....	69
Tabla 21 Factores de amenaza sísmica. Denominación, parámetros, rangos y valores.....	70
Tabla 22 Probabilidad de Inestabilidad del material basal según la cercanía a la falla tectónica.....	72
Tabla 23 Factores de amenaza volcánica.....	73
Tabla 24 Factores de amenaza volcánica. Parámetros, rangos y valores.....	74
Tabla 25 Factores de amenaza hidrológica. Caracterización.....	80
Tabla 26 Factores de amenaza de Remoción en masa. Caracterización.....	80
Tabla 27 Factores de amenaza sísmica. Caracterización.....	81
Tabla 28 Factores de amenaza volcánica. Caracterización.....	81
Tabla 29 Rango y puntaje de valores de los indicadores de susceptibilidad física.....	86
Tabla 30 Rango y puntaje de valores de los indicadores de susceptibilidad física.....	87
Tabla 31 Cálculo del indicador en función de los rangos de amenaza e indicadores de resiliencia.....	88
Tabla 32 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza hidrológica (H). Valores máximos estimados.....	90
Tabla 33 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza hidrológica (H) Valores mínimos estimados.....	91
Tabla 34 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza de remoción en masa (RM) Valores máximos estimados.....	92
Tabla 35 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza de remoción en masa (RM). Valores mínimos estimados.....	93
Tabla 36 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza sísmica (SM). Valores máximos estimados.....	94

Tabla 37 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza sísmica (SM). Valores mínimos estimados.	94
Tabla 38 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza volcánica (V). Valores máximos estimados.	96
Tabla 39 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza volcánica (V). Valores mínimos estimados.	96
Tabla 40 Indicador de vulnerabilidad según probabilidad y estado de daño.	109
Tabla 41 Nivel de daño y parámetros estadísticos.	110
Tabla 42 Riesgo hidrológico Sistema de Abastecimiento.	117
Tabla 43 Riesgo hidrológico. Sistema de Saneamiento.	118
Tabla 44 Riesgo de remoción en masa Sistema de Abastecimiento.	119
Tabla 45 Riesgo de remoción en masa Sistema de Saneamiento.	120
Tabla 46 Riesgo sísmico Sistema de Abastecimiento.	121
Tabla 47 Riesgo sísmico Sistema de Saneamiento.	122
Tabla 48 Riesgo volcánico Sistema de Abastecimiento.	123
Tabla 49 Riesgo volcánico Sistema de Saneamiento.	124
Tabla 50 Resumen de riesgos específicos y Componentes de la Infraestructura hidráulica.	125
Tabla 51 Niveles de criticidad y grado de riesgo. Caso de aplicación.	127
Tabla 52 Población abastecida e indicador de disponibilidad del recurso.	134
Tabla 53 Nivel de continuidad del servicio e indicador de calidad.	134
Tabla 54 Matriz de Vulnerabilidad.	143
Tabla 55 Matriz de Vulnerabilidad Normalizada.	144
Tabla 56 Factores de amenaza hidrológica.	147
Tabla 57 Factores de amenaza de Remoción en masa.	147
Tabla 58 Factores de amenaza sísmica.	147
Tabla 59 Factores de amenaza volcánica.	148
Tabla 60 Parámetros estadísticos y nivel de daño.	149
Tabla 61 Indicador de vulnerabilidad (I_v) y probabilidad de daño.	150
Tabla 62 Peligrosidad hidrológica. Nivel, frecuencia, parámetro crítico, periodo de retorno (T), y rangos de variación.	197
Tabla 63 Niveles de gravedad o de peligrosidad hidrológica. Descripción, parámetros y factor.	198
Tabla 64 Frecuencia, periodos de retorno e Intensidad, y niveles de amenaza, en relación a precipitaciones y caudales máximos,	199
Tabla 65 Factores de amenaza hidrológica. Valores min-máx. Ponderaciones.	200
Tabla 66 Zonas y Niveles de peligro de remoción en masa.	202
Tabla 67 Factores de amenaza de Remoción en masa. Valores min-máx. Ponderaciones.	213
Tabla 68 Niveles de riesgo rangos de PGA y distancias epicentrales.	215
Tabla 69 Estados de daño y factores de daño de referencia.	215
Tabla 70 Ventanas temporales (T) en función de la magnitud y fuente Sismogénica, y desviación estándar evaluada en el año 1 $\sigma_1 = \sqrt{T} = 1$ (Stepp, 1971-1972)	216
Tabla 71 Grado de daño medio y vulnerabilidad. Riesgo sísmico.	217
Tabla 72 Factores de amenaza sísmica. Valores min-máx. Ponderaciones.	217
Tabla 73 Factores de amenaza volcánica. Valores min-máx. Ponderaciones.	219
Tabla 74 Niveles de peligro. Metodologías MUB. y NVEWS-SERNAGEOMÍN.	222
Tabla 75 Indicadores de Susceptibilidad física (I_{sf}) y operacional (I_{so}) de Acueducto.	224
Tabla 76 Indicadores de Susceptibilidad física (I_{sf}) y operacional (I_{so}) de Captación Superficial.	225

Tabla 77 Indicadores de Susceptibilidad física (<i>I_{sf}</i>) y operacional (<i>I_{so}</i>) de Embalse.....	226
Tabla 78 Indicadores de Susceptibilidad física (<i>I_{sf}</i>) y operacional (<i>I_{so}</i>) de Estanque o Depósito.	227
Tabla 79 Indicadores de Susceptibilidad física (<i>I_{sf}</i>) y operacional (<i>I_{so}</i>) de Plantas Elevadoras o Estaciones de Bombeo de Agua Potable.....	228
Tabla 80 Indicadores de Susceptibilidad física (<i>I_{sf}</i>) y operacional (<i>I_{so}</i>) de Plantas o Estaciones de Tratamiento de Agua Potable.....	229
Tabla 81 Indicadores de Susceptibilidad física (<i>I_{sf}</i>) y operacional (<i>I_{so}</i>) de Captación Superficial.....	230
Tabla 82 Indicadores de Susceptibilidad física (<i>I_{sf}</i>) y operacional (<i>I_{so}</i>) de la Red de Distribución. ...	231
Tabla 83 Indicadores de Susceptibilidad física (<i>I_{sf}</i>) y operacional (<i>I_{so}</i>) de la Red de Transporte.	232
Tabla 84 Indicadores de Susceptibilidad física (<i>I_{sf}</i>) y operacional (<i>I_{so}</i>) de Plantas o Estaciones Elevadoras o de Bombeo de Aguas Servidas.....	233
Tabla 85 Indicadores de Susceptibilidad física (<i>I_{sf}</i>) y operacional (<i>I_{so}</i>) de Plantas de Tratamiento o Depuradoras de Aguas Servidas o Residuales.	234
Tabla 86 Indicadores de Susceptibilidad física (<i>I_{sf}</i>) y operacional (<i>I_{so}</i>) de la Red de Saneamiento.	235
Tabla 87 Caracterización de Acueducto. Aplicación de PAJ	245
Tabla 88 Caracterización de Captación Superficial. Aplicación de PAJ	248
Tabla 89 Caracterización de Embalse. Aplicación de PAJ.	251
Tabla 90 Caracterización de Estanque. Aplicación de PAJ.....	254
Tabla 91 Caracterización de Planta elevadora de agua potable. Aplicación de PAJ.	258
Tabla 92 Caracterización de Planta de Tratamiento de agua potable. Aplicación de PAJ.	262
Tabla 93 Caracterización de Pozos de Captación. Aplicación de PAJ.....	266
Tabla 94 Caracterización de Redes de distribución. Aplicación PAJ.	270
Tabla 95 Caracterización de la Red de Transporte. Aplicación de PAJ.	274
Tabla 96 Caracterización de Planta Elevadora de Aguas Servidas. Aplicación de PAJ.	277
Tabla 97 Caracterización de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas. Aplicación de PAJ.	281
Tabla 98 Caracterización de la Red de Aguas Servidas. Aplicación de PAJ.	285
Tabla 99 Indicadores de susceptibilidad física de los acueductos (AC)	307
Tabla 100 Rangos y valores de Indicadores de susceptibilidad física de los acueductos (AC).	307
Tabla 101 Indicadores de susceptibilidad física de las captaciones superficiales (CS)	308
Tabla 102 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de las captaciones superficiales (CS).	309
Tabla 103 Indicadores de susceptibilidad física de los embalses (EMB)	309
Tabla 104 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de los embalses (EMB).	310
Tabla 105 Indicadores de susceptibilidad física de los estanques (EST).....	311
Tabla 106 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de los estanques (EST).	312
Tabla 107 Indicadores de susceptibilidad física de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP)	313
Tabla 108 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de la Plantas elevadoras de agua potable (PEAP).....	314
Tabla 109 Indicadores de susceptibilidad física de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)	315
Tabla 110 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de las Plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).....	316
Tabla 111 Indicadores de susceptibilidad física de los pozos de captación (PC)	317
Tabla 112 Rangos y valores de Indicadores de susceptibilidad física de los pozos de captación (PC).	318
Tabla 113 Indicadores de susceptibilidad física de la red de distribución (RD)	319

Tabla 114 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de la red de distribución (RD).	319
Tabla 115 Indicadores de susceptibilidad física de la red de transporte (RT)	320
Tabla 116 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de la red de transporte (RT). ..	321
Tabla 117 Indicadores de susceptibilidad física de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS)	322
Tabla 118 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS)	323
Tabla 119 Indicadores de susceptibilidad física de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)	324
Tabla 120 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).....	325
Tabla 121 Indicadores de susceptibilidad física de la red de alcantarillado (RAS)	326
Tabla 122 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de la red de alcantarillado (RAS)	327
Tabla 123 Indicadores de susceptibilidad operacional de los acueductos (AC)	329
Tabla 124 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de los acueductos (AC).	329
Tabla 125 Indicadores de susceptibilidad operacional de las captaciones superficiales (CS)	330
Tabla 126 Rangos y valores de susceptibilidad operacional de las captaciones superficiales (CS)...	330
Tabla 127 Indicadores de susceptibilidad operacional de los embalses (EMB)	331
Tabla 128 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de los embalses (EMB).	331
Tabla 129 Indicadores de susceptibilidad operacional de los estanques (EST).....	331
Tabla 130 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de los estanques (EST).	332
Tabla 131 Indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP)	332
Tabla 132 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP).....	333
Tabla 133 Indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)	333
Tabla 134 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)	334
Tabla 135 Indicadores de susceptibilidad operacional de los pozos de captación (PC)	334
Tabla 136 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de los pozos de captación (PC).	334
Tabla 137 Indicadores de susceptibilidad operacional de la red de distribución (RD)	335
Tabla 138 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de la red de distribución (RD).	335
Tabla 139 Indicadores de susceptibilidad operacional de la red de transporte (RT).....	336
Tabla 140 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de la red de transporte (RT).	336
Tabla 141 Indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS).....	337
Tabla 142 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS).	337
Tabla 143 Indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)	338
Tabla 144 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).....	338
Tabla 145 Indicadores de susceptibilidad operacional de la red de alcantarillado (RAS)	339

Tabla 146 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de la red de alcantarillado (RAS).....	340
Tabla 147 Indicadores de resiliencia hidrológica de los acueductos (AC)	341
Tabla 148 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de los acueductos (AC).....	341
Tabla 149 Indicadores de resiliencia hidrológica de las captaciones superficiales (CS).....	342
Tabla 150 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de las captaciones superficiales (CS).	342
Tabla 151 Indicadores de resiliencia hidrológica de los embalses (EMB).....	343
Tabla 152 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de los embalses (EMB).....	343
Tabla 153 Indicadores de resiliencia hidrológica de los estanques (EST)	344
Tabla 154 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de los estanques (EST).	344
Tabla 155 Indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP).....	345
Tabla 156 Rangos y valores de índices de resiliencia hidrológica plantas elevadoras de agua potable (PEAP).....	345
Tabla 157 Indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)	346
Tabla 158 Rangos y valores de índices de resiliencia hidrológica de plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).....	346
Tabla 159 Indicadores de resiliencia hidrológica de los pozos de captación (PC).....	347
Tabla 160 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de pozos de captación (PC)..	347
Tabla 161 Indicadores de resiliencia hidrológica de la red de distribución (RD)	348
Tabla 162 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de la red de distribución (RD).	348
Tabla 163 Indicadores de resiliencia hidrológica de la red de transporte (RT)	348
Tabla 164 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de la red de transporte (RT)..	349
Tabla 165 Indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS)	350
Tabla 166 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS).	350
Tabla 167 Indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)	351
Tabla 168 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).	351
Tabla 169 Indicadores de resiliencia hidrológica de la red de alcantarillado (RAS).....	352
Tabla 170 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de redes de aguas servidas (RAS).	352
Tabla 171 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de los acueductos (AC)	353
Tabla 172 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de los acueductos (AC).	354
Tabla 173 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de las captaciones superficiales (CS) ...	354
Tabla 174 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de las captaciones superficiales (CS).	355
Tabla 175 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de los embalses (EMB)	355
Tabla 176 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de los embalses (EMB).	356
Tabla 177 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de los estanques (EST)	356
Tabla 178 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de los estanques (EST).	357

Tabla 179 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP).....	357
Tabla 180 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de plantas elevadoras de agua potable (PEAP).....	358
Tabla 181 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).....	358
Tabla 182 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).....	359
Tabla 183 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de los pozos de captación (PC).....	359
Tabla 184 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de los pozos de captación (PC).....	360
Tabla 185 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de distribución (RD).....	360
Tabla 186 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de distribución (RD).....	361
Tabla 187 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de transporte (RT).....	361
Tabla 188 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de transporte (RT).....	362
Tabla 189 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas elevadoras de aguas servidas.....	362
Tabla 190 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS).....	363
Tabla 191 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).....	363
Tabla 192 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).....	364
Tabla 193 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de alcantarillado (RAS).....	364
Tabla 194 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de red de aguas servidas (RAS).....	365
Tabla 195 Indicadores de resiliencia sísmica de los acueductos (AC).....	366
Tabla 196 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica en acueductos (AC).....	367
Tabla 197 Indicadores de resiliencia sísmica de las captaciones superficiales (CS).....	367
Tabla 198 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de las captaciones superficiales (CS).....	368
Tabla 199 Indicadores de resiliencia sísmica de los embalses (EMB).....	368
Tabla 200 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de los embalses (EMB).....	369
Tabla 201 Indicadores de resiliencia sísmica de los estanques (EST).....	369
Tabla 202 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de los estanques (EST).....	370
Tabla 203 Indicadores de resiliencia sísmica de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP)	370
Tabla 204 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de plantas elevadoras de agua potable (PEAP).....	371
Tabla 205 Indicadores de resiliencia sísmica de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)	371
Tabla 206 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).....	372
Tabla 207 Indicadores de resiliencia sísmica de los pozos de captación (PC).....	372
Tabla 208 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de los pozos de captación (PC).....	373
Tabla 209 Indicadores de resiliencia sísmica de la red de distribución (RD).....	373
Tabla 210 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de red de la distribución (RD).....	374
Tabla 211 Indicadores de resiliencia sísmica de la red de transporte (RT).....	374

Tabla 212 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de la red de transporte (RT).....	375
Tabla 213 Indicadores de resiliencia sísmica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS) .	376
Tabla 214 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS).	376
Tabla 215 Indicadores de resiliencia sísmica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)	377
Tabla 216 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).	377
Tabla 217 Indicadores de resiliencia sísmica de la red de alcantarillado (RAS)	378
Tabla 218 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de la red de aguas servidas (RAS).	378
Tabla 219 Indicadores de resiliencia volcánica de los acueductos (AC)	379
Tabla 220 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de los acueductos (AC).	380
Tabla 221 Indicadores de resiliencia volcánica de las captaciones superficiales (CS)	380
Tabla 222 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de captaciones superficiales (CS).	381
Tabla 223 Indicadores de resiliencia volcánica de los embalses (EMB)	381
Tabla 224 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de los embalses (EMB).	382
Tabla 225 Indicadores de resiliencia volcánica de los estanques (EST)	382
Tabla 226 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de los estanques (EST).	383
Tabla 227 Indicadores de resiliencia volcánica de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP) .	383
Tabla 228 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP).....	384
Tabla 229 Indicadores de resiliencia volcánica de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)	384
Tabla 230 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).....	385
Tabla 231 Indicadores de resiliencia volcánica de los pozos de captación (PC)	385
Tabla 232 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de los pozos de captación (PC).	386
Tabla 233 Indicadores de resiliencia volcánica de la red de distribución (RD)	386
Tabla 234 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de la red de distribución (RD)..	387
Tabla 235 Indicadores de resiliencia volcánica de la red de transporte (RT)	387
Tabla 236 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de la red de transporte (RT). ...	388
Tabla 237 Indicadores de resiliencia volcánica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS)	389
Tabla 238 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS).	389
Tabla 239 Indicadores de resiliencia volcánica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)	390
Tabla 240 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).	390
Tabla 241 Indicadores de resiliencia volcánica de la red de alcantarillado (RAS)	391
Tabla 242 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de la red de aguas servidas (RAS).	391

Índice de Gráficas

Gráfica 1 Representación de la evolución del factor de amenaza hidrológica:	63
Gráfica 2 Representación de la evolución del factor de amenaza hidrológica:	64
Gráfica 3 Representación de la evolución del factor de amenaza de remoción en masa:	67
Gráfica 4 Representación de la evolución del factor de amenaza de remoción en masa:	67
Gráfica 5 Representación de la evolución del factor de amenaza de remoción en masa:	68
Gráfica 6 Representación de la evolución del factor de amenaza Sísmica:	70
Gráfica 7 Representación de la evolución del factor de amenaza Sísmica:	71
Gráfica 8 Representación de la evolución del factor de amenaza Sísmica:	71
Gráfica 9 Representación de la evolución del factor de amenaza volcánica:	74
Gráfica 10 Representación de la evolución del factor de amenaza volcánica:	75
Gráfica 11 Representación de la evolución del factor de amenaza volcánica:	75
Gráfica 12 Comparativa de la Evolución de Riesgos específicos en la red de distribución de agua potable, en las ciudades de Santiago (Chile), y en Murcia (España).	176
Gráfica 13 Incremento de la amenaza específica, e incidencia de los factores de amenaza según localización.	176



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Índice de Fotografías

Fotografía 1. Avenida en la Contraparada, río Segura a su paso por la pedanía de Javalí Viejo. Obsérvese la gran cantidad de sedimentos. Octubre de 1982.	36
Fotografía 2. Episodio de inundación en la ciudad de Murcia, octubre de 2012.	37

1. Introducción

1.1. Justificación de la investigación

La resiliencia y la sostenibilidad de las ciudades, en un marco de cambio climático, con la ocurrencia de eventos catastróficos de origen natural, cada vez más extremos y variables, adquieren una nueva dimensión en la que es necesaria una adecuada implantación. En esta nueva situación, asegurar la disponibilidad operativa de las líneas vitales, en este caso las infraestructuras hidráulicas, es fundamental.

La gestión de los riesgos hidrológicos y geológicos, y su interacción con la operación de un Sistema de Infraestructuras Hidráulicas Urbanas, representa un valor esencial, sobre todo, para el desarrollo de la sociedad y de la actividad económica, en entornos urbanos.

Las metodologías de análisis de riesgo analizan a partir de una caracterización de la infraestructura hidráulica la susceptibilidad y la resiliencia de esta, considerando la tipología de amenazas existentes, para ello plantean diferentes enfoques, ya sea el determinístico, el probabilístico, o el híbrido que intenta aglutinar ambos.

Existen diferentes modelos de gestión que a partir de la parametrización de variables físicas como operacionales, cuantifican el grado de vulnerabilidad y el riesgo, a partir de un análisis de amenazas, obteniendo el grado de daño potencial específico de los componentes de la Infraestructura hidráulica, proponiendo curvas de fragilidad de estos, con enfoques muchas veces probabilísticos. Sin embargo, se ha constatado durante el análisis de los diferentes modelos más representativos para la obtención de la vulnerabilidad, y del riesgo específico de una infraestructura crítica, como lo es en este caso la infraestructura hidráulica urbana, que dichos métodos de análisis multi-riesgos, pueden ajustarse en mayor grado, mediante la estructuración homogénea y representativa de la información inicial, que permita una correlación objetiva de las variables características y parámetros (físicos y operacionales) definitorios de la misma, con una visión holística del riesgo, a partir de la integración lógica de los indicadores e índices más representativos de la Infraestructura Hidráulica.

Resulta relevante la integración de la Infraestructura hidráulica urbana, a través de indicadores representativos de la misma, con el grado de vinculación correspondiente, ya desde el punto de vista físico de ésta como operacional.

La infraestructura quedaría totalmente caracterizada a partir de los indicadores de susceptibilidad de esta, tanto física como operacional. Por otra parte, la interacción de la susceptibilidad de la infraestructura hidráulica con las amenazas específicas a través de la definición y construcción de los indicadores de resiliencia permite obtener la vulnerabilidad de aquella de manera integral en su definición como en su caracterización. A partir de ahí, una caracterización de las amenazas específicas a nivel de micro zona o sector, vinculadas a la criticidad de las diferentes componentes de la Infraestructura hidráulica, permitiría una definición del riesgo potencial ajustada al daño posible. Para ello, es necesario además de lo ya indicado, completar el inventario de información histórica disponible, analizar en un horizonte temporal la evolución de los indicadores definidos, avanzando en su representatividad en el Sistema de Infraestructuras.

Al objeto, de analizar su aplicación a diferentes Sistemas de Abastecimiento y de Saneamiento urbanos, se consideran casos de estudio, y es mediante la caracterización y el análisis de componentes de la infraestructura hidráulica urbana, correspondientes a los abastecimientos de las ciudades de Santiago, en Chile, y de la ciudad de Murcia, en España, como se propone ajustar dicha investigación a la aplicación real.

A continuación, se describe y caracteriza brevemente cada una de las localizaciones indicadas al objeto de establecer un marco inicial de actuación.

La ciudad de Santiago se caracteriza por presentar recurrentes eventos extremos de origen hidrológico y geológico, dentro de los cuales destacan las inundaciones, crecidas, aluviones, remociones en masa, sismos y erupciones volcánicas. Estos acontecimientos tienen como consecuencias, entre otras, muertes, extravíos, daño a propiedades e infraestructura, interrupción del suministro de servicios básicos y multas para las empresas correspondientes.

Con relación a la ciudad de Murcia, ésta presenta episodios puntuales de inundación en diversas zonas de la ciudad, con ocasión de lluvias intensas, de periodicidad irregular, así como un riesgo potencial de amenaza

sísmica, que, aunque de intensidad inferior a 7 en la escala IMM, su característica de superficialidad unida a la cercanía de fallas geológicas, así como la tipología de terreno, y morfología representa un riesgo no menor de daño en la infraestructura hidráulica.

Hoy en día se les exige a las empresas que estén preparadas ante eventos extremos, siendo capaces de poder mantener la continuidad del servicio, mitigando así sus efectos adversos. La capacidad de recuperarse, absorber y disminuir el daño provocado por estos acontecimientos se define como resiliencia. Esta última puede mejorarse mediante planificación, administración y gestión de riesgos, constituyendo de esta forma acciones concretas y activas frente a las recurrentes e inciertas amenazas tanto hidrológicas como geológicas que afectan a las ciudades.

Este documento tiene por objetivo definir y caracterizar los riesgos hidrológicos y geológicos de un sistema de infraestructura hidráulicas urbanas. Se propone una metodología de análisis de riesgo de la infraestructura hidráulica frente a amenazas extrínsecas. El riesgo se compone de dos factores: amenaza y vulnerabilidad, esta última se divide, a su vez, en dos componentes: susceptibilidad y resiliencia. Para determinar la vulnerabilidad del sistema, se proponen indicadores de susceptibilidad física y operacional que caracterizarían la infraestructura hidráulica y para el cálculo de la resiliencia se construyen indicadores de resiliencia para cada componente frente a amenazas hidrológicas y geológicas.



1.2. Objetivos y alcances

La caracterización de la Infraestructura hidráulica desde una perspectiva holística requiere de un análisis físico y operacional de la misma, según el marco local de gestión del Sistema, así como de las amenazas específicas de naturaleza hidrológica y geológica y su afectación local, y de manera particular a los componentes de la Infraestructura hidráulica, todo ello entendido como un planteamiento inicial que permita desarrollar en el tiempo, acciones de planificación, planes de gestión y mitigación de daños y estrategias de gestión de la misma, por lo que se plantean los siguientes objetivos:

1.2.1. Objetivos

Los objetivos principales y secundarios de la presente tesis doctoral son los que se describen a continuación:

- **Objetivos principales:**

1. Proponer una metodología de análisis de riesgo de la infraestructura hidráulica.
2. Caracterizar las amenazas hidrológicas y geológicas, así como seleccionar los factores de amenaza con afectación potencial en el sistema de infraestructura hidráulica.
3. Proponer indicadores de susceptibilidad física y operacional, representativos del sistema de infraestructura hidráulica.
4. Proponer indicadores de resiliencia de la infraestructura hidráulica frente a amenazas hidrológicas y geológicas.
5. Definir una metodología de seguimiento de la gestión de un Sistema de Infraestructuras hidráulica.

- **Objetivos secundarios:**

1. Propuesta metodológica para el análisis del riesgo hidrológico y geológico de la infraestructura hidráulica urbana.
2. Análisis de parámetros y variables definitorias de los componentes de la Infraestructura hidráulica urbana.
3. Caracterización de amenazas hidrológicas y geológicas, y factores de amenaza vinculados a éstas.
4. Definición y caracterización de indicadores de Susceptibilidad física y operacional, e indicadores de resiliencia de la Infraestructura hidráulica.
5. Caracterización de riesgos específicos.
6. Obtención de Índices de daños específicos de la Infraestructura hidráulica.
7. Definición y construcción de indicadores generales o de Sostenibilidad del Sistema.
8. Definición de la metodología de seguimiento de la Gestión de riesgos.

1.2.2. Alcances

- Caracterizar las amenazas hidrológicas y geológicas específicas que afectan a los sistemas de infraestructuras hidráulicas. Casos de estudio: Murcia, España, y Santiago (Chile).
- Proponer indicadores de susceptibilidad física y operacional de la infraestructura hidráulica en función de los principales componentes del sistema de abastecimiento y el de saneamiento.
- Proponer indicadores de resiliencia de la infraestructura hidráulica frente a amenazas hidrológicas y geológicas representativas de las zonas de estudio.
- Caracterización de riesgos específicos por componente básica de la Infraestructura hidráulica urbana.



1.3. Antecedentes de las zonas de estudio

A continuación, se presentan algunos antecedentes de las amenazas hidrológicas y geológicas que han afectado a las zonas de estudio propuestas, en las que se localizan los Sistemas de Infraestructuras de abastecimiento y de saneamiento, caracterizados y analizados en esta investigación:

- Ciudad de Santiago, Región Metropolitana (Chile).
- Ciudad de Murcia (España).

La ciudad de Santiago situada en el cono Sur de América, en Chile, se localiza en las coordenadas UTM (x: 347.091,32; y: 6.296.590,32), y coordenadas geográficas (-33° 27' 33.2244" S; -70° 38' 43.2528" W), a una altitud de 554 m.s.n.m., junto a la cordillera de los Andes, en la zona central de país.

Las amenazas naturales que más incidencia presentan o con potencial afectación son la amenaza hidrológica que a su vez se divide en crecida e inundación y la amenaza geológica en remoción en masa, sísmica y volcánica.

En cuanto a la amenaza hidrológica, en la Tabla 1 se presenta, a modo de ejemplo, un registro histórico de algunos eventos extremos de crecida y aluviones en la Región Metropolitana.

Tabla 1 Registro histórico de crecidas y aluviones en la Región Metropolitana.

Año	Descripción del evento	Número de muertos	Personas damnificadas
1982	Precipitaciones intensas, desborde del río Mapocho y el canal San Carlos. Corte suministro de agua potable,	15	15.272
1986	Precipitaciones intensas, desborde de los ríos Mapocho y Maipo. Corte suministro de agua potable.	4	24.671
1993	Aluvión de la Quebrada de Macul. Desborde del Zanjón de la Aguada y de los canales San Carlos y Las Perdices	26	32.646

Fuente: ONEMI,(1991) y ONEMI, (1995)

Con respecto a la amenaza de remoción en masa, entre el año 2008 y principios del 2017 se han producido cinco eventos de turbiedad extrema en el río Maipo, estos fluctúan entre los meses de enero y mayo. La turbiedad promedio del río Maipo es de 200 UNT, mientras que las plantas de tratamiento están diseñadas para operar hasta con 4000 UNT, es decir 20 veces más que la turbiedad promedio (Aguas Andinas, 2017).

En la Tabla 2 se presentan los valores de turbiedad máxima luego de eventos de intensas lluvias convectivas en la precordillera con isoterma cero recientemente en continuo acenso, lo que ha provocado aludes en quebradas afluentes al río Maipo. Se observa que los valores varían entre valores de 43.750 UNT hasta 382.500 UNT, es decir hasta más de 1900 veces el promedio del río Maipo.

Esto ha traído como consecuencia la interrupción del suministro de agua potable para gran parte de la población, la cual se abastece en más de un 60% del recurso proveniente de este río.

Tabla 2 Registro histórico de alta turbiedad en el río Maipo.

Evento	Fecha	Turbiedad Máxima (UNT)	Duración Total (hr)	Turbiedad media del evento (UNT/hr)
1	05/2008	43.750	69	10.830
2	01/2013	180.000	20	16.945
3	02/2013	382.500	75	36.861
4	04/2016	79.000	94	18.921
5	02/2017	238.000	46	37.000

Fuente: (Aguas Andinas, 2017)

En cuanto a la amenaza sísmica, en la Tabla 3 se presentan, a modo de ejemplo, algunos de los terremotos recientes que han afectado, de mayor o menor medida, a la ciudad de Santiago.

Tabla 3 Registro de terremotos con afectación a la ciudad de Santiago.

Año	Longitud	Latitud	Región epicentro	Magnitud (Mw)
1985	-33,240	-71,850	Valparaíso	8,0
2010	-36,290	-73,239	Biobío	8,8
2015	-31,553	-71,864	Coquimbo	8,4

Fuente: (Centro Sismológico Nacional (GUC), 2018)

Con respecto a la amenaza volcánica, en la Tabla 4 se presentan los eventos históricos de mayor actividad de los volcanes activos más próximos a la ciudad de Santiago.

Tabla 4 Registro histórico de mayor actividad volcánica.

Volcán Tupungatito	Volcán San José	Volcán Maipo
1959-1961	1941	1908
1986-1987	1959-1960	1912

Fuente: (SERNAGEOMIN, Red Nacional de Vigilancia Volcánica de Chile, 2018)

Se constata que la ciudad de Santiago contempla antecedentes recurrentes de amenazas de tipo hidrológica y geológica, las cuales afectan tanto directa como indirectamente el sistema de infraestructura hidráulica.

La ciudad de Murcia, en España, se localiza en el Sureste del país, en la Comunidad Autónoma del mismo nombre, que bordea el mar Mediterráneo, y cuyas coordenadas UTM (x: 664349.469; y: 4205731.614), y coordenadas geográficas (37°59'3.68491"N; 1°7'42.81667" W), a una altitud media de 45 m.s.n.m., a orillas del río Segura, en la depresión pre litoral, dividida en dos zonas de norte a sur, por la Sierra de Carrascoy de 1051 m de altitud.

Las amenazas naturales que más incidencia o potencial afectación presentan son la amenaza hidrológica normalmente crecidas de cauces, sobre todo ramblas o y torrenteras, e inundación, y la amenaza geológica con eventuales episodios de remoción en masa, y sismos de pequeña o mediana intensidad.

Sobre todo, la amenaza hidrológica, durante el último siglo ha ocasionado innumerables pérdidas humanas y materiales. La época del año en la que las inundaciones se dan con mayor frecuencia es el otoño (con un 53,3%), siendo el mes de octubre en el que se registran el mayor número de ellas (28% respecto al total anual)

y las de consecuencias más devastadoras, tanto por el número de pérdidas humanas como por las pérdidas materiales. (Inundaciones en la Región de Murcia, en los inicios del siglo XXI, Castejón Porcel, G. y Romero Díaz, A., Universidad de Murcia, 2014).

Durante el pasado siglo XX se han realizado diversas presas de contención de avenidas, que han aliviado y resguardado zonas de riesgo de inundación, aunque en los episodios de lluvias intensas, aun en núcleos urbanos generan importantes incidencias, sobre todo por la orografía prácticamente llana, con escasas pendientes, un importante grado de impermeabilización de las superficies, la aridez del territorio, que ocasiona la degradación de los suelos, facilitando las escorrentías, y la insuficiente capacidad de las infraestructuras para absorber los caudales máximas generados por las lluvias de carácter torrencial, que en ciertos episodios pueden superar los 25 mm en 30 minutos, e incluso los 50 mm, cuando la pluviometría anual no supera los 350 mm. Figura 1.

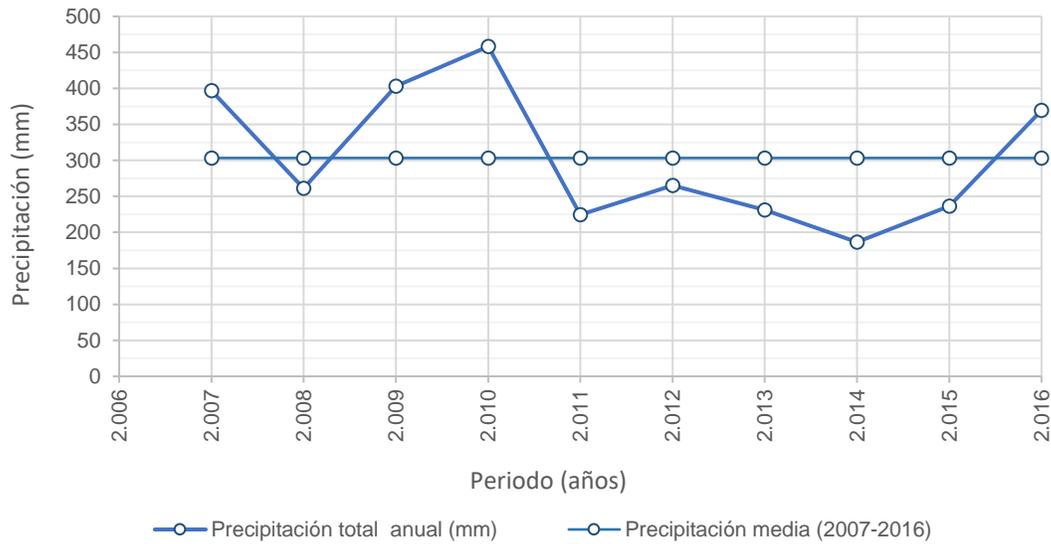


Figura 1 Distribución de precipitaciones anuales acumuladas en el área de estudio en el periodo (1993-2014).

Fuente: EMUASA.

Con relación a la amenaza hidrológica, en la Tabla 5, se presenta, un registro histórico de algunos de los últimos eventos extremos de inundación producidos en la ciudad de Murcia.

Tabla 5 Histórico de eventos de inundación en la Región de Murcia.

Año	Episodio	Consecuencias
1973	Riada de Puerto Lumbreras	> 87 fallecidos (300 en el SE español). 4.580 viviendas afectadas. Inundaciones generalizadas en la Región de Murcia.
2012	Lluvias intensas.	Inundaciones en numerosas zonas de la Región de Murcia. Hubo 3 víctimas mortales y una persona desaparecida.
2014	Lluvias intensas.	Calles anegadas, e inundaciones localizadas en Murcia, además de otras localizaciones de la Región de Murcia.
2016	Lluvias intensas. Nivel 2 de alerta.	Episodios de inundaciones generalizadas en la Región, con mayor incidencia en zonas costeras.
2018	Lluvias intensas superiores a 30 l/m2.	La tromba de agua causa inundaciones en calles y carreteras y varios apagones de electricidad.

Fuente: González López, S. Delegación Gobierno en Murcia, AEMET.

Por lo que se constata que los episodios de inundación siguen generando importantes incidencias en las infraestructuras, y riesgo de pérdida de vidas humanas, a pesar de las actuaciones en infraestructuras hidráulicas realizadas durante los últimos años.



Fotografía 1. Avenida en la Contraparada, río Segura a su paso por la pedanía de Javalí Viejo. Obsérvese la gran cantidad de sedimentos. Octubre de 1982.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura.



Fotografía 2. Episodio de inundación en la ciudad de Murcia, octubre de 2012.
Fuente: Diario La Verdad.

En relación a los eventos de carácter sísmico acaecidos en la Región de Murcia, se constata que aunque durante las últimas décadas, no ha habido grandes terremotos catastróficos, a excepción del ocurrido en Lorca, en el año 2011, de intensidad 5,4 (IMM), que por sus características, de escasa profundidad, direccionalidad de falla y tipología de terreno, generó grandes daños y pérdida de vidas humanas, ello no es óbice de considerar que la ciudad de Murcia, en particular presenta un peligro sísmico de ocurrencia de terremotos de grado 7 (IMM), cuyas consecuencias se verían incrementadas sobre todo, por la tipología de suelos existente y el nivel freático elevado.

Tabla 6 Histórico de terremotos de $M_s \geq 0.7$ ocurridos en el Término municipal de Murcia durante el Periodo 1933-2017.

Fecha	Profundidad	Magnitud (M_s)	Localización
	(km)		
21/06/1933	0	3.9	ESPARRAGAL.MU
14/05/1946	0	4.2	SANGONERA.MU
14/04/1961	0	3.9	MURCIA.MU NW
18/02/1986	9	3.7	SE MURCIA.MU
01/11/2015	0	1.5	E MURCIA.MU
02/11/2015	0	1.5	S MURCIA.MU
14/04/2016	0	1.1	SE MURCIA.MU
24/05/2016	0	0.7	SE MURCIA.MU
25/05/2016	0	0.8	SE MURCIA.MU
30/05/2016	0	2.1	S MURCIA.MU
15/06/2016	5	2.1	S MURCIA.MU
07/08/2016	6	1.1	S MURCIA.MU
07/08/2016	7	2.4	E MURCIA.MU
16/08/2012	11	1.6	SE MURCIA.MU
07/08/2016	11	2.3	SE MURCIA.MU
07/08/2016	11	1.2	S MURCIA.MU
07/08/2016	11	1.3	S MURCIA.MU
07/08/2016	11	1.6	SE MURCIA.MU
24/08/2016	12	2.3	S MURCIA.MU
29/12/2016	12	1.8	S MURCIA.MU
08/02/2017	12	1.5	S MURCIA.MU
05/04/2017	12	2	SE MURCIA.MU

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

En una primera parte se presenta una revisión bibliográfica de metodologías de análisis de riesgo de infraestructuras y en una segunda parte la metodología propuesta con el desarrollo de esta, y los modelos metodológicos inicial y final, donde analiza la evolución del análisis propuesto.

2. Revisión de metodologías de análisis de riesgo de infraestructuras

2.1. Revisión de conceptos

El riesgo se define como la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas a causa de un desastre, resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones vulnerables a las cuales está expuesto el elemento DELNET-ONU, (2009). Otra definición es la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Los factores que lo componen son la amenaza y la vulnerabilidad CIIFEN, (2018). En este estudio se define la amenaza como el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad UNDRO, (1979).

La amenaza se define como un peligro latente asociado con un fenómeno físico de origen natural o tecnológico que puede presentarse turas y/o el medio ambiente, expresado como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad en un cierto sitio y en cierto período de tiempo. La amenaza puede presentar diferentes niveles de afectación potencial, UNDRO, (1979). Otra definición corresponde a procesos o fenómenos que pueden transformarse en un evento perjudicial y destructor ante la exposición de personas o instalaciones físicas, que pueden causar la muerte, lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental de un territorio o comunidad, DELNET-ONU, (2009). A su vez se define como fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales. La amenaza se determina en función de la intensidad y la frecuencia. CIIFEN, (2018). En este estudio se define la amenaza como la intensidad esperada que puede provocar daño ante una eventual exposición, condicionada por los factores específicos de la zona

La vulnerabilidad de la infraestructura se define como el conjunto de características y circunstancias de un sistema de infraestructura que lo hacen susceptible a los efectos anómalos de una amenaza SUBDERE, (2011). Otra definición es la disposición interna de un sistema, objeto o sujeto a ser afectado por una amenaza, Vargas, (2002). A su vez se define como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso. UNDRO, (1979). En este estudio se define la vulnerabilidad de un sistema de infraestructura hidráulica como el conjunto de características y circunstancias del sistema de infraestructura que lo hacen susceptible a los efectos dañinos de una amenaza CIIFEN, (2018)

La susceptibilidad se define como la mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra sobre determinado espacio geográfico, CONAE, (2009). Otra definición es el grado de fragilidad interna de un sujeto, objeto o sistema para enfrentar una amenaza y recibir un posible impacto debido a la ocurrencia de un evento adverso. CIIFEN, (2018). En este estudio se define la susceptibilidad de la infraestructura hidráulica como las características tanto físicas como operacionales, que determinan la fragilidad o debilidad intrínseca de un sistema de infraestructura hidráulica.

La resiliencia, de manera general, se define como la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas. CIIFEN, (2018). En este estudio se define la resiliencia de un sistema de infraestructura hidráulica como su capacidad de respuesta frente a una amenaza extrínseca específica.

2.2. Revisión de metodologías

Las diferentes metodologías existentes de análisis de riesgos se pueden clasificar en dos grandes tendencias, por una parte, los modelos de análisis selectivo o parcial del riesgo y por otra parte, los modelos de análisis de carácter holístico del riesgo.

2.2.1. Modelos de análisis selectivo o parcial del riesgo

Como preámbulo a este análisis metodológico, es necesario indicar, que la mayoría de las investigaciones existentes, sobre vulnerabilidad de infraestructuras tuvieron su origen en el análisis de la amenaza sísmica, para posteriormente incorporar otros tipos de amenaza (metodologías multirriesgo), por lo que hay una extensa bibliografía referenciada que incide en este aspecto.

Este tipo de estrategia está basada en modelos de análisis de vulnerabilidad que confieren un marco de actuación que se limita al análisis de la vulnerabilidad a partir de la medición de la capacidad estructural de los componentes del sistema y los efectos producidos, integrando de manera parcial la capacidad de gestión de esta. Este análisis se utiliza, en general, para evaluar de manera individual los componentes del sistema, de manera independiente, sin necesidad de estudiar su interacción con los otros. A continuación, se presentan algunas de las metodologías indicadas, que, en mayor o menor grado, se han incluido y desarrollado en la investigación realizada:

Corsanego & Petrini (1990), proponen una metodología de análisis de la vulnerabilidad estableciendo una clasificación de las técnicas de evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Dichas técnicas propuestas pueden ser directas, indirectas, convencionales e híbridas. Las técnicas directas predicen el daño mediante métodos tipológicos y mecánicos, mientras que las técnicas indirectas consideran las estructuras como elementos de clases, definidas éstas por su tipología de material, las técnicas y otros factores que afecten a la respuesta sísmica. Las técnicas convencionales, son esencialmente heurísticas e incorporan un índice de vulnerabilidad independiente de la predicción de daño. Son utilizadas para comparar construcciones de una misma tipología constructiva, en una determinada zona y de acuerdo con determinados factores, cuya contribución a la resistencia sísmica es calibrada por expertos. Se utilizó esta técnica en (ATC-13, 1985); y se incluye en la metodología (FEMA-HAZUS, 2004). Mientras que las técnicas híbridas: es una metodología basada en observaciones y en opiniones de expertos (escala macrosísmica). Dichos postulados, se han analizado y desarrollado parcialmente en la definición de daños incluida en la presente investigación.

Así mismo, PAHO, OPS (1998), desarrolla una metodología que define el número de fallas generadas por movimientos sísmicos, en la red de agua potable, introduce factores físicos y de gestión de la red, tipologías de terreno, y parámetros sísmicos característicos, lo que se ha considerado e integrado en la presente investigación, completando su caracterización.

IDNDR-RADIUS (1999), es una herramienta de diagnóstico preliminar del riesgo sísmico en áreas urbanas, cuyos objetivos directos son desarrollar escenarios de daños por terremotos y herramientas prácticas para la gestión del riesgo sísmico, urbano en todo el mundo y promover así el intercambio de información en este ámbito. No es una herramienta precisa para la estimación de daños causados por terremotos, ya que solo facilita una estimación preliminar de los mismos, y no considera otros factores importantes como es el análisis del daño en infraestructuras críticas esenciales después del terremoto, u otros factores económicos.

ISDR-ONU (2000), es una estrategia internacional (ONU), para la reducción del riesgo de desastres. Basada en un análisis global de riesgos de desastres naturales, plantea estrategias de mitigación de daños en las comunidades vulnerables, países o zonas geográficas, incidiendo en la generación de políticas públicas de adaptación al cambio climático. Esta estrategia para la Reducción del Riesgo de Desastres busca promover una "cultura de prevención", para la mitigación de sus efectos, basada en la experiencia adquirida durante el Decenio Internacional para la Reducción de Desastres Naturales (1990-1999), que inició la Asamblea General en 1989. Dicho enfoque estratégico se ha incluido en los postulados desarrollados en la metodología propuesta.

Kircher, Reitherman, Whitman, & Arnold (1997), plantean sus investigaciones en relación con la estimación de pérdidas y estados de daño en edificios. Esta metodología planteada por Whitman et al., representa un importante avance en la predicción de los impactos del terremoto. A diferencia de otros modelos de pérdidas de edificios basados en la Intensidad Mercalli Modificada (IMM), ésta usa medidas cuantitativas de terremotos y analizan los tipos de construcción de modelos de manera similar al análisis de ingeniería de una estructura única. Su análisis se ha considerado en la investigación realizada, para configurar la tipología de daños.

Eidinger & Ávila (1999), plantean formulaciones empíricas para cuantificar el número de roturas en tuberías con ocasión de eventos sísmicos, según análisis de la fragilidad y ductilidad de las tuberías, introduciendo variables críticas sísmicas, tales como la velocidad máxima del terreno (PGV), la aceleración máxima del terreno afectado (PGA), la deformación máxima del terreno (PGD) con ocasión de un movimiento sísmico. Sus postulados, aunque se han analizado durante la investigación desarrollada, se han revisado y propuesto diversos indicadores representativos.

Pineda Porras & Ordaz (2007), con un planteamiento de formulaciones de fragilidad sísmica para sistemas de tuberías segmentadas enterradas ante movimientos diferenciales del terreno (subsistencia diferencial, DGS), ya que este diferencial afecta a la respuesta sísmica del suelo en relación aquellos, incrementando la vulnerabilidad de las tuberías enterradas. Al igual que Pineda Porras, Ballantyne (2010), propone el análisis de la vulnerabilidad de las tuberías aunque estableciendo una relación con los movimientos y la deformación del terreno (PGD) debidos a deslizamientos y movimientos de fallas, en base a cuatro factores característicos de aquellas, tales como la rigidez, la resistencia a flexión, la flexibilidad y la restricción de la junta, donde la tipología de materiales de las tuberías resulta determinante. Establece recomendaciones de empleo y priorización en la renovación de las tuberías, basada en la vulnerabilidad sísmica y en parámetros de relacionados con la gestión de activos. SRM-LIFE (2007), también incorpora una metodología de caracterización de la vulnerabilidad en las redes de agua potable y alcantarillado, a partir de la definición de parámetros físicos y de operación por componentes críticos del sistema, fijando una estimación de o nivel de daño de estos. Tras su análisis dichas propuestas se consideran muy acertadas en el desarrollo de los indicadores físicos y operacionales propuestos, así como en la evaluación de daños.

Rodriguez (2011), analiza y evalúa diversos parámetros físicos y operacionales característicos de las redes de agua potable y de alcantarillado, así como de diversas infraestructuras hidráulicas, introduciendo curvas de fragilidad o de estados de daño, relacionadas con el riesgo sísmico. Incluye, además, una integración de resultados y la generación de posibles escenarios en plataforma GIS. Dicho análisis se ha desarrollado y complementado en la investigación incorporando nuevos indicadores.

USGS-NVEWS (2005), desarrolla una metodología de análisis del riesgo volcánico, que utiliza SERNAGEOMIN, y basa en la realización de la sumatoria de todos los valores que se han obtenido de cada uno de los factores de peligro, así como de los valores de los factores de vulnerabilidad, para posteriormente multiplicar las dos sumatorias, obteniendo el valor de riesgo para un determinado volcán. Los valores de riesgo se clasifican en 5 niveles de rango. Para determinar las áreas de peligro, con la metodología NVEWS, se dividen las áreas en dos tipologías, área proximal y área distal, según su cercanía al o los centros eruptivos. Los postulados de dicha metodología se han incorporado en la caracterización de amenazas realizada en la propuesta metodológica.

Lara M. (2007) y Muñoz Morales (2013) así como Campos Maza (2014) y Naranjo & Varela (1996), plantean metodologías de análisis de la susceptibilidad de remoción en masa en la zona de precordillerana y urbana de Santiago. Es necesario diferenciar entre una u otra dependiendo de las características de la zona de análisis, ya que la metodología de Lara M., (2007) se aplica a una escala a nivel de hoya hidrográfica y, la de Muñoz, E., (2013), a nivel de áreas urbanas. Dichas metodologías, obtienen un índice de susceptibilidad basado en la suma de puntajes ponderados para distintos factores condicionantes de algunos tipos de fenómenos de remociones en masa, aunque la ponderación de cada factor es diferente en cada

Contreras (2016), establece simulaciones para evaluar los efectos de la concentración de sedimentos en inundaciones en la Quebrada de Ramón, estableciendo un marco de referencia para la evaluación del peligro de crecidas.

PATRICOVA (2015), es una Metodología correspondiente al Plan de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación de la Comunidad Valenciana, incorpora los postulados de Directiva Europea de prevención del riesgo de inundación EU (Directiva 2007/60/C), incidiendo en la evaluación de daños potenciales (costes y cartografía de impacto económico), según porcentaje de daños en infraestructura y variables

hidráulicas (calado y velocidad). Sus postulados, se incluyen en la definición y caracterización de la amenaza hidrológica.

Los criterios para el análisis de consecuencias económicas por inundación no distinguen entre inundación fluvial y pluvial, planteando una de las metodologías más utilizadas, dentro del marco normativo vigente en España en materia de riesgo de inundación para la estimación de consecuencias en zonas urbanas, así como el “Plan Especial de Emergencias por Inundación (INUNCAT)” de 2009, publicado por la Agencia Catalana del Agua (ACA) en 2009.

Del mismo modo, Economic Guidance Memorandum (EGM) elaborado por USACE, Dawson, (2003), también plantea una metodología de análisis de riesgo hidrológico basada en el establecimiento de curvas calado-daños que asignan un nivel de daños (en porcentaje) en función del nivel del agua alcanzado por la inundación. Estimado el valor económico del bien o de la zona inundada, pueden establecerse las pérdidas económicas a partir del grado de destrucción ocasionado por la inundación. A su vez, existen en la bibliografía diversas recomendaciones para la incorporación del efecto de sistemas de aviso en la estimación de costes económicos por inundación. Estos estudios se basan en la reducción de daños materiales por la implantación de medios de barrera al paso del agua en viviendas y locales comerciales Parker et al, (2005). Las pérdidas económicas de un evento de inundación pueden clasificarse en tangibles (cuantificables) e intangibles (no cuantificables). A su vez, los costes tangibles pueden dividirse en costes directos e indirectos. En este documento, la evaluación de consecuencias económicas se basa en la estimación de costes directos e indirectos.

Estas últimas metodologías basadas en los postulados de Kates, 1978, realizan una estimación de daños en base a la altura de la lámina de agua o calado, y la frecuencia del evento, mediante un cálculo sencillo, incorporando a su vez, la variable velocidad de flujo, como factor agravante del daño.



2.2.2. Modelos de análisis de carácter holístico del riesgo

Esta estrategia propone un marco conceptual que analiza y mide la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta del sistema, en el que se involucran no solo las características físicas, sino los aspectos sociales, de manera individualizada por componente y área. Identificando las causas de la vulnerabilidad, las actuaciones a realizar para mitigar sus efectos además de su prioridad, en base a la capacidad de respuesta de los componentes del Sistema. Plantea el riesgo a partir de la identificación de los términos críticos, se definen explícitamente, integrándose en un modelo conceptual detallado de riesgo. Se evalúan las interacciones entre los distintos componentes y con la sociedad. Seguidamente se describen brevemente las principales metodologías que proponen esta estrategia basada en indicadores:

Las investigaciones metodológicas planteadas por Cardona O.D. (Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos, 2001); Carreño, et al. (2006); Birkmann (2006) se circunscriben al análisis del riesgo sísmico, aunque en el caso de Birkmann (2006), éste realiza un planteamiento más generalista. El análisis de vulnerabilidad propuesto en este ámbito conceptual, como se ha indicado anteriormente, está basado en la caracterización física y operacional de la infraestructura, desarrollando estrategias de mitigación de daños, y definiendo escenarios de daño basados en la microzonación sísmica. Introduce impactos económicos, sociales, medioambientales, y evaluando las pérdidas económicas y de vidas humanas como consecuencia de dichos impactos. Se plantea la gestión del riesgo, incluyendo políticas de restauración y estrategias de mitigación.

Cardona O.D. (2001): Analiza desde los conceptos de peligro, vulnerabilidad y riesgo, precisando que ello, es un requisito básico para la construcción de un marco teórico coherente, con una visión holística de los riesgos. Se discuten y critican otros enfoques, como los desarrollados en las ciencias naturales, aplicadas y sociales. Así mismo, se argumenta que la fragmentación conceptual y la inconsistencia han sido dos de las razones por las cuales las estrategias de reducción del riesgo no han resultado exitosas, en la mayoría de las ocasiones. La falta de una base conceptual adecuada ha impedido aplicar dichas estrategias. Así mismo, Cardona O.D. (2001) destaca que la diferencia principal entre amenaza y riesgo está en que la amenaza está relacionada con la probabilidad de que se manifieste un evento natural o un evento provocado, mientras que el riesgo está relacionado con la probabilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias, las cuales están íntimamente relacionadas no sólo con el grado de exposición de los elementos sometidos sino con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento.

Barbat & Cardona (2003): En esta investigación, se indica que la gestión del riesgo tiene una doble dimensión de realidad y posibilidad, cuya reconstrucción mediante indicadores puede ayudar a representar las potencialidades de una situación dada, es por ello, que su conocimiento debe contribuir a organizar de forma efectiva la intervención sobre la realidad.

Carreño, et al. (2006), proponen la utilización de indicadores de riesgo urbano para la evaluación holística del riesgo. La ponderación de los distintos indicadores se realiza en base al nivel de su criticidad, esta ponderación debe ser calibrada para cada sistema particular. De esta forma el índice de riesgo físico se obtiene para cada unidad de análisis de los escenarios concretos afectados, y cada amenaza considerada.

Oliveira, Roca, & Goula (2006): Plantean una metodología de carácter específico para las líneas vitales en su conjunto, presentando una estructuración lógica y funcional más amplia de los diferentes aspectos involucrados en el riesgo sísmico, incluso las políticas de restauración y las estrategias de mitigación. En cambio, no explicita otros factores considerados relevantes en la definición de un sistema de infraestructuras urbanas de líneas vitales, tal vez por el amplio espectro que considera. Así mismo, contempla una interrelación con otros riesgos vinculados, e interferencias entre líneas vitales que, aunque coincide con la presente investigación, presenta en un contenido general que no caracteriza suficientemente el sistema urbano de líneas vitales. No caracteriza los restantes riesgos hidrológicos y geológicos, involucrados, salvo aquellos efectos colaterales con el riesgo sísmico, que caracteriza, analiza y evalúa, para la obtención del índice de fiabilidad del sistema de líneas vitales, y las propuestas de restauración y de medidas de mitigación.

Existen otras metodologías multirriesgo que igualmente tiene un enfoque holístico, aunque de aplicación regional, como es el caso de las que se indican a continuación:

FEMA-HAZUS (2004): Es una metodología de análisis multirriesgo de aplicación regional que, mediante curvas de fragilidad de los componentes de un Sistema, definidas por diferentes parámetros críticos según la tipología de riesgo obtienen la probabilidad y el nivel de daño de la infraestructura. Se seleccionan los parámetros o variables que definen cada infraestructura con relación al riesgo propuesto. Esta metodología tuvo su origen en el análisis del riesgo sísmico en Infraestructuras vitales, específicas de Estados Unidos de América.

Mouroux, et al. (2004), CORDIS-SYNER-G (2012): Mouroux, et al. (2004) presentan el programa Risk-UE, el cual desarrolla y aplica metodologías homogéneas, y avanzadas para el estudio de la amenaza, de la vulnerabilidad y analizando escenarios de riesgo sísmico en áreas urbanas europeas. En el proyecto RISK-UE, se analizaron 7 ciudades europeas, incluida Barcelona, entre otras. El proyecto RISK-UE, aunque investiga diversos aspectos de la vulnerabilidad en el ámbito urbano, incorpora además el análisis de líneas vitales a semejanza de la metodología FEMA-HAZUS, (2004), empleando un GIS, que posteriormente se desarrolló en el proyecto CORDIS-SYNER-G, (2012), generando un software abierto (SYNER-G), para el análisis de la vulnerabilidad sísmica y la evaluación de riesgos en Europa, y en otras áreas. En el proyecto SYNER-G, se procedió a analizar los riesgos en varios países del Sur de Europa (Italia, Grecia y Austria), en concreto las ciudades de L'Aquila, Salónica y Viena, como casos de estudio, generando modelos y mapas de riesgo, además de funciones de fragilidad basadas en estas experiencias.

2.2.3. Selección de metodologías base

Dentro de las metodologías mencionadas anteriormente, la investigación se basa principalmente en los planteamientos de Cardona O.D. (Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos, 2001) y de Carreño, et al. (2006)

Dicha selección se ha realizado en base a la sencillez de cálculo, la simplicidad en la definición de los indicadores, su grado de definición, y el rápido análisis de su evolución temporal, como herramienta de planificación, previsión, y de toma de decisiones en tiempo real.

En enfoque seguido por estas metodologías multirriesgo enunciadas, en el que se analiza el riesgo físico en la infraestructura urbana, se basa en la generación de indicadores representativos de la misma, a partir un análisis de amenazas y de vulnerabilidad, con una visión integral de la misma respecto a su afectación, permitiendo a partir de una formulación simple y estructurada, correlacionar dicho riesgo con el daño potencial sobre la infraestructura.

El enfoque “holístico” de la investigación de modelos de gestión de infraestructuras que se plantea, que se circunscribe a los riesgos hidrológico, y geológico, analiza todos los factores que caracterizan dichos riesgos (enfoque holístico), pero al mismo tiempo es parcial en el ámbito del riesgo, al considerar, como se ha indicado, únicamente los riesgos hidrológico y geológico. La investigación propuesta, asimila los planteamientos de Cardona O.D. (Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos, 2001) que formula indicadores de riesgo físico (IR_H) para potenciales escenarios de riesgo (amenaza y vulnerabilidad física), estimando los descriptores de amenaza relativa (H_S) y la convolución con la vulnerabilidad extrínseca o de contexto, basado en indicadores de exposición (E_v), contexto fragilidad social (F_v) y resiliencia (R_v).

Con respecto a las amenazas extrínsecas consideradas, estas corresponden principalmente a la amenaza geológica e hidrológica. En relación con la amenaza geológica, se analizan la amenaza sísmica, la de remociones en masa o “aluviones”, y la volcánica, según los postulados de las metodologías descritas anteriormente, tales como FEMA-HAZUS (2004) y SERNAGEOMIN (2018) ya que permiten a partir de una reducida información inicial, y un análisis robusto de factores y variables críticas representativas de las amenazas, obtener una caracterización suficiente de las mismas.

En el caso de la amenaza hidrológica, se han seguido los criterios de la Directiva 2007/60/CE, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, además de la metodología contemplada en el (PATRICOVA-Generalitat Valenciana, PATRICOVA: Plan de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana, 2015), que aunque, se ha aplicado localmente, establece las variables y parámetros, para generar correlaciones en otras áreas, y caracterizar la amenaza hidrológica.

Dichas metodologías seleccionadas cuyos postulados se han analizado y considerado en la investigación, presentan un análisis relativamente sencillo de los riesgos, mediante indicadores físicos y operacionales, así como de las variables, y de los factores críticos de amenaza, cuya estructura de análisis podría ser de aplicación a la Infraestructura hidráulica urbana, incorporando otros enfoques, y otras consideraciones locales.

La caracterización de la infraestructura hidráulica por medio de indicadores, siguiendo las investigaciones de Cardona, O.D. (2005-2006), Carreño, M.L, Cardona, O.D., Barbat, A.H. (2005), e IDEA (2005), entre otras, permitiría de manera simple y sencilla, mediante la definición de rangos, definidos por una escala numérica, y la designación de valores, obtener los siguientes hitos:

- La definición física y operacional de cada componente de la Infraestructura hidráulica.
- La caracterización de esta en relación con la identificación de la susceptibilidad potencial de esta.
- La caracterización de la capacidad de respuesta (resiliencia) de cada componente de la infraestructura hidráulica frente a las amenazas hidrológicas y geológicas caracterizadas localmente (microzonificación de amenazas).
- Realizar un análisis multicriterio y multidisciplinar del comportamiento de la Infraestructura hidráulica y las amenazas analizadas.
- La planificación de actuaciones, y la implantación de las medidas de mitigación (resiliencia) ante potenciales eventos de las amenazas analizadas (hidrológica y geológica).
- La recopilación o inventario de la información estrictamente necesaria, además de la estructuración de esta.
- Integración de los componentes de la Infraestructura hidráulica desde la perspectiva de la gestión de procesos.
- La integración de procesos permitiría definir un enfoque holístico, que mejoraría la adaptación de la infraestructura hidráulica a la dinámica de las amenazas.
- Seguimiento (evolución temporal) del comportamiento de la infraestructura hidráulica, por componente básico y el Sistema de Infraestructuras hidráulicas en su conjunto.
- Disminuye las incertidumbres al mejorar la definición de cada componente de la infraestructura hidráulica, y el grado de afectación, o de interacción de estos, así como su influencia en la operación integral de la misma.
- La ponderación de los valores realizada, aunque inicialmente obedece a criterios subjetivos (opiniones de expertos), se justifica de manera objetiva mediante el empleo de del procedimiento de análisis jerárquico (P.A.J.), de Saaty Thomas L., (1980).

3. Metodología de evaluación de riesgo de la infraestructura hidráulica

3.1. Definiciones

El riesgo (R) tal y como lo define UNDRP, (1979), estaría expresado por el producto de la amenaza (A) potencial y extrínseca, y de la vulnerabilidad (V), y mediría el daño esperado. Se calcula en unidades de daño [*Daño*], en función del sistema específico considerado. Existen varias formas de cuantificar el daño (pérdidas humanas, personas desaparecidas, horas de interrupción de servicio), sin embargo, en este estudio se contempla cuantificarlo en términos monetarios. (1).

Amenaza (A), se define como la intensidad de un evento esperado que puede provocar daño ante una eventual exposición, condicionada por los factores específicos de la zona. Esta potencial amenaza define zonas con distintos valores esperados de afectación, se mide en unidades críticas [U_{c_k}], propias de cada amenaza determinada por un parámetro crítico y factores de amenaza o peligro (2).

Es decir, una amenaza estaría representada por un parámetro crítico que defina de manera más significativa la evolución de esta. Por, ejemplo en el caso de la amenaza sísmica, dependiendo de la tipología de sismo y factores geomorfológicos, podría emplearse la aceleración sísmica máxima, o bien otros como la velocidad sísmica máxima o los espectros de frecuencia.

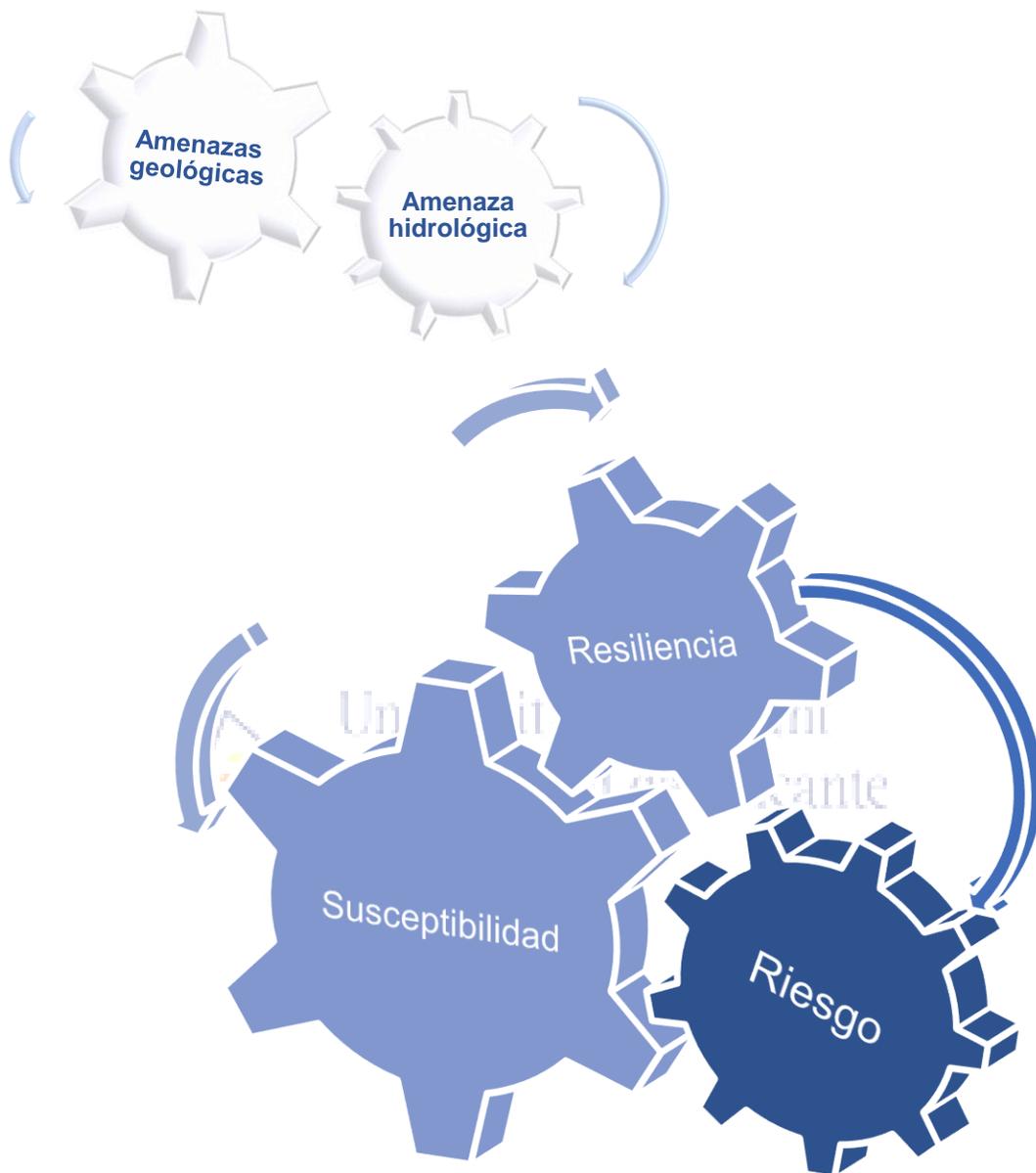
Los factores de amenaza incrementarían la intensidad o valor de la amenaza inicial definida por el parámetro crítico, según la microzonificación realizada.

La Vulnerabilidad (V) de la infraestructura se define como el conjunto de características y circunstancias del sistema de infraestructura que lo hacen susceptible a los efectos dañinos de una amenaza, CIIFEN, (2018). Este índice se mide en unidades de daño por unidad crítica propio de cada amenaza, contemplando tanto la susceptibilidad intrínseca del sistema como la resiliencia frente a una potencial amenaza, cuantificando el daño de la infraestructura frente a esta [$Daño \cdot U_{c_k}^{-1}$]. (4)

La Susceptibilidad (S) se define como las características tanto físicas como operacionales, que determinan la fragilidad o debilidad intrínseca de un sistema, se calcula en base a indicadores de susceptibilidad físicos y operacionales. Este índice se considera de manera adimensional en este estudio debido a que busca caracterizar las propiedades del sistema de infraestructura. (5)

La Resiliencia (α) de la infraestructura hidráulica se define como la capacidad de respuesta de un sistema de infraestructura hidráulica frente a una amenaza extrínseca específica. Se calcula en base a indicadores de resiliencia de los componentes de la infraestructura, frente a una determinada amenaza, en un proceso dinámico de adaptación. Este índice tiene dimensiones de unidad crítica específica de cada amenaza por unidad de daño propio de cada sistema. [$U_{c_k} \cdot Daño^{-1}$]. Mientras mayor sea su valor, mayor es su capacidad de respuesta frente a una amenaza, junto con un menor daño en la infraestructura (6).

A continuación, en la Figura 2 se muestra el flujograma de interacción de los componentes constituyentes del riesgo.



$$\begin{aligned} \text{Riesgo específico} &= \text{Amenazas} * \text{Vulnerabilidad} \\ &= \text{Amenazas (A)} * \frac{\text{Susceptibilidad (S)}}{\text{Resiliencia (\alpha)}} \end{aligned}$$

Figura 2 Componentes del Riesgo. Amenazas y Vulnerabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Metodología

En la Figura 3 se presenta el esquema conceptual de la metodología general, el riesgo (R) se calcula mediante la multiplicación de sus dos componentes: la amenaza extrínseca (A) y la vulnerabilidad intrínseca (V) (1). La primera a modo de ejemplo se compone de tres tipologías: amenaza hidrológica (A_H), geológica (A_G) y meteorológica (A_M), cabe destacar que se pueden considerar múltiples amenazas en esta metodología. La segunda componente corresponde a la vulnerabilidad intrínseca (V), la cual se calcula mediante la susceptibilidad (S) y la resiliencia (α) (4). Para determinar la susceptibilidad se requiere definir indicadores tanto físicos como operacionales, los cuales permiten poder gestionar y evaluar el estado de los distintos componentes del sistema de infraestructura hidráulica (5).

Finalmente, para determinar la resiliencia de cada tipología de infraestructura frente a potenciales amenazas específicas, se construyen indicadores de resiliencia que permiten cuantificar el efecto de esta en la infraestructura hidráulica (6).

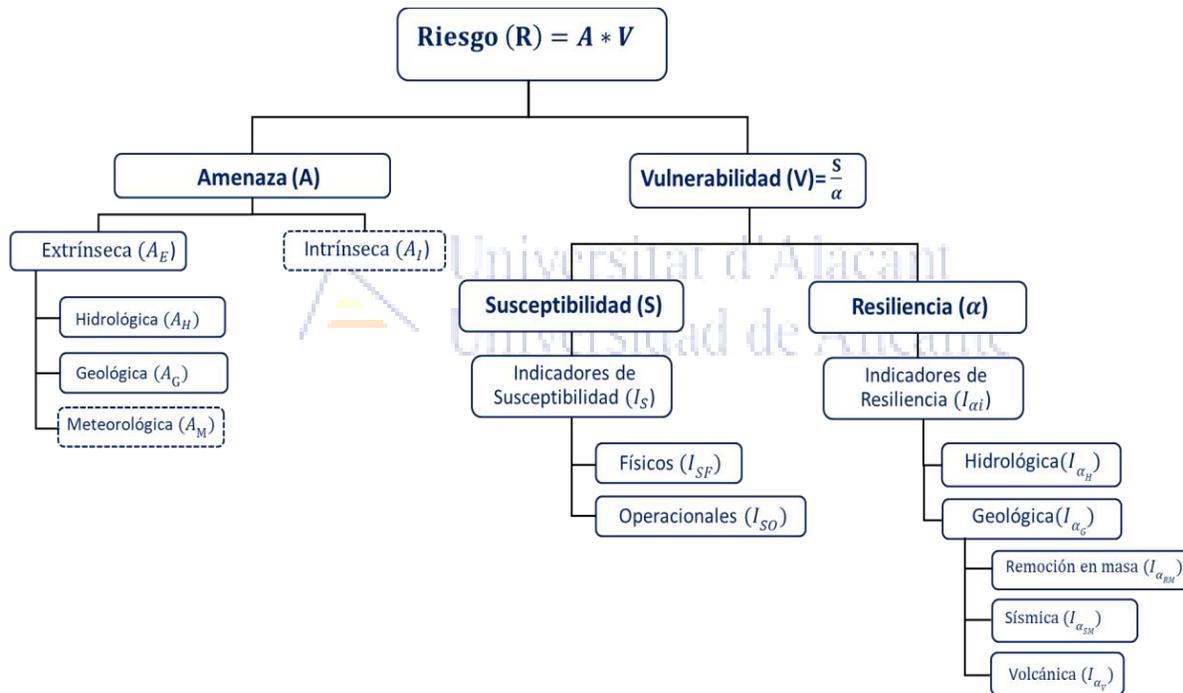


Figura 3 Esquema conceptual de la metodología. Fuente: Elaboración Propia

En la ecuación (1) se presenta el riesgo específico para cada una de las k amenazas e i tipologías de infraestructura, este se calcula mediante la multiplicación entre la amenaza y la vulnerabilidad. El riesgo se cuantifica en unidades de daño, dependiendo de la naturaleza del riesgo específico que se busca determinar, la amenaza en unidades del parámetro crítico de la amenaza específica [Uc_k] y finalmente la vulnerabilidad en unidades de daño por unidad del parámetro crítico de la amenaza específica [$Daño \cdot Uc_k^{-1}$].

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

En la ecuación (2), se presenta la amenaza (A_k) obteniéndose la misma mediante la multiplicación entre el parámetro incidente crítico de amenaza o peligro (Pp_k) y la multiplicatoria de los $G(k)$ factores de amenaza o peligro (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,

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

En la ecuación (3a) se presenta cada uno de los factores de amenaza (Fp_{kg}), calculados en base a la ponderación de éstos y de la ponderación de la amenaza k , y posteriormente a su vez, la multiplicatoria de los $G(k)$ factores de amenaza o peligro (Fp_{kg}), según la ecuación (3b), los cuales pueden acentuar o atenuar la incidencia del parámetro crítico. Finalmente, la amenaza queda representada de la manera expresada por la ecuación (3c). Siendo $W_{Fp_{kgm\acute{a}x}}$ el peso del factor de amenaza específica, y el parámetro crítico Pp_k , es lo que define al valor de la amenaza umbral o inicial.

$$Fp_{kg} = 1 + (W_{Fp_{kg}} \cdot (\sum W_{Fp_{kgm\acute{a}x}} - 3) \cdot W_{Fp_{kgm\acute{a}x}}) \quad (3a)$$

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

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

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}).

$$V_{ki} [Da\tilde{n}o \cdot Uc_k^{-1}] = \frac{S_i []}{\alpha_{ki} [Uc_k \cdot Da\tilde{n}o^{-1}]} \quad (4)$$

En la ecuación (5) se presenta el detalle del cálculo de la susceptibilidad intrínseca de cada tipología de la infraestructura hidráulica, identificando dos principales componentes: la susceptibilidad física (S_{fi}), determinada por los F_i indicadores de susceptibilidad física y la susceptibilidad operacional (S_{oi}), determinada por los O_i indicadores de susceptibilidad operacional de cada componente del sistema de infraestructura hidráulica.

$$S_i [] = S_{f_i}[] + S_{o_i}[] = \sum_{n=1}^{F_i} W_{s_{f_{in}}} \cdot I_{s_{f_{in}}} + \sum_{j=1}^{O_i} W_{s_{o_{ij}}} \cdot I_{s_{o_{ij}}} \quad (5)$$

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 ($I_{\alpha_{kil}}$).

$$\alpha_{ki}[U_{C_k} \cdot Da\tilde{n}o^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{ki}} W_{\alpha_{kil}} \cdot I_{\alpha_{kil}} [U_{C_k} \cdot Da\tilde{n}o^{-1}] \quad (6)$$

La resiliencia obtenida de cada componente se adapta a su vez, según los rangos de amenaza función del parámetro crítico seleccionado y los factores de amenaza correspondientes, así como de los rangos de resiliencia establecidos, según lo indicado en la Tabla 9.

Obtenidos los indicadores de susceptibilidad y de resiliencia específicos de cada amenaza, se homogenizan sus valores, verificando así la expresión (7). Es decir, mediante la homogeneización se integran los respectivos rangos de variación, cuyo rango de variación teórico estaría entre 0 y 1, pero que, en la práctica para evitar indeterminaciones matemáticas, se fijaría un valor total, mínimo de 0.10 y un valor total máximo de 1.

$$\sum_1^i I_{S_i} + \sum_1^i I_{\alpha_{ki}} = 1 \quad (7)$$

Los valores de fluctuación de los indicadores de resiliencia se encuentran entre un valor mínimo de 0.10 y un valor máximo de 1.0. Respecto a los indicadores de susceptibilidad, éstos operan entre un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 1. Todo ello con el fin de evitar indeterminaciones de orden matemático, como de índole práctica, ya que valores inferiores a esas estimaciones propuestas no se producen.

La vulnerabilidad obtenida V_{ki} , según la ecuación (4), de la infraestructura hidráulica, se normalizaría a valores cuyo rango de fluctuación se encuentra entre un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 1.0.

En la tabla adjunta se recogen los valores de vulnerabilidad normalizados y los valores de los indicadores y de resiliencia obtenidos.

Tabla 7 Matriz normalizada de vulnerabilidad, en función de los indicadores de susceptibilidad y de resiliencia normalizada.

		Susceptibilidad																				
		0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
Resiliencia	1.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10
	0.95	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11
	0.90	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11
	0.85	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12
	0.80	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13
	0.75	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.13
	0.70	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14
	0.65	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15
	0.60	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17
	0.55	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15	0.16	0.17	0.18
	0.50	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20
	0.45	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22
	0.40	0.00	0.01	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.25
	0.35	0.00	0.01	0.03	0.04	0.06	0.07	0.09	0.10	0.11	0.13	0.14	0.16	0.17	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.26	0.27	0.29
	0.30	0.00	0.02	0.03	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.18	0.20	0.22	0.23	0.25	0.27	0.28	0.30	0.32	0.33
	0.25	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40
	0.20	0.00	0.03	0.05	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.28	0.30	0.33	0.35	0.38	0.40	0.43	0.45	0.48	0.50
	0.15	0.00	0.03	0.07	0.10	0.13	0.17	0.20	0.23	0.27	0.30	0.33	0.37	0.40	0.43	0.47	0.50	0.53	0.57	0.60	0.63	0.67
	0.10	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
	0.05	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
0.01	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	

Fuente: Elaboración propia.

Con lo que se obtendría la vulnerabilidad homogenizada de cada componente de la infraestructura V_{ki}^h respecto de la amenaza específica, es decir $V_{ki}^h = V_{ki} [Daño \cdot Uc_k^{-1}]$, según se indica en la ecuación (8).

En las ecuaciones (9) y (10), se presenta a modo de ejemplo, el detalle del cálculo del riesgo específico del componente i frente a la amenaza k.

$$R_{ki} [Daño] = A_k[Uc_k] \cdot \frac{S_i []}{\alpha_{ki}[Uc_k \cdot Daño^{-1}]} \tag{9}$$

$$R_{ki} [Daño] = Pp_k[Uc_k] \cdot \left(\prod_{g=1}^{G(k)} Fp_{kg} \right) \cdot \left(\frac{(\sum_{d=1}^{F_i} Wsf_{id} \cdot Isf_{id} + \sum_{j=1}^{O_i} Wso_{ij} \cdot Iso_{ij}) []}{(\sum_{l=1}^{L_{ki}} W\alpha_{kil} \cdot I\alpha_{kil}) [Uc_k \cdot Daño^{-1}]} \right) \tag{10}$$

En cuanto al seguimiento de los indicadores o variables en el tiempo, se introduce un parámetro $[\gamma_X]_{[N(X)*N(X)]}^t$, el cual permite conocer la variación del valor de un indicador X . Este parámetro es una matriz diagonal de dimensiones $N(X)*N(X)$, donde $N(X)$ es el número de columnas de la variable X (11).

$$[X]_{[1*N(X)]}^t = [X]_{[1*N(X)]}^0 X [\gamma_X]_{[N(X)*N(X)]}^t \quad (11)$$

En la ecuación (12) se presenta la construcción de cada componente de la diagonal de $[\gamma_X]_{[N(X)*N(X)]}^t$, considerando que es una variación en el tiempo. Se introduce un resto (ε), positivo y cercano a 0^+ , de modo que si $[X](1, n)^0 = 0$, la ecuación no se indetermina.

$$[\gamma_X](n, n)^t = \frac{[X](1, n)^t}{[X](1, n)^0 + \varepsilon} \quad , \quad \varepsilon > 0 \wedge \varepsilon \ll \quad (12)$$



- **Caracterización y análisis de amenazas locales seleccionadas**

Expuesto el esquema metodológico general descrito, se procede en primer lugar a la caracterización de las amenazas hidrológicas y geológicas, los parámetros críticos definitorios de las mismas, así como los factores de amenaza seleccionados, considerados más representativos en la investigación.

Las principales amenazas hidrológicas y geológicas zonales específicas que pudieran afectar la infraestructura hidráulica urbana, corresponden en una primera parte a la amenaza hidrológica (crecidas e inundaciones) y en una segunda parte a la amenaza geológica, constituida a su vez en esta investigación por las amenazas, de remoción en masa, sísmica y volcánica. Cabe destacar que, este estudio, que un tipo de infraestructura hidráulica se vería amenazada siempre y cuando ésta se encuentre emplazada en la zona de la amenaza correspondiente, con lo cual una infraestructura fuera de ésta tiene una amenaza esperada cercana a cero, dependiendo del grado de susceptibilidad y la resiliencia de la misma.

Estas amenazas se calculan mediante parámetros críticos, cuyo valor podría representar la esperanza de la amenaza, es decir la suma de las posibles intensidades ponderadas por su probabilidad, en función del período de retorno correspondiente. Luego este valor se podría ver modificado por los factores de peligro específicos que amplificarían o atenuarían la intensidad del parámetro crítico. Para cada factor de amenaza o peligro se dispondría de una relación entre sus diferentes clases (c_m) y los puntajes asignados a cada clase. Según la naturaleza del factor, este puede ser cuantitativo (ej: pendiente del terreno) o cualitativo (ej.: tipo de suelo), con lo cual, la clase correspondiente sería un rango de valores (cuantitativo) o una característica del factor (cualitativo). En el caso en que el puntaje asignado sea mayor a 1, el factor sería incremental, mientras que, si es inferior a 1, el factor sería atenuante, tal como se presenta en la Tabla 13.

Tabla 8 Puntaje y rango de valores de los factores de amenaza.

Clases del Fp_{Hg} ($c_m(Fp_{Hg})$)	Puntuación asignada al Fp_{Hg}	Tipo de factor
c_0	0	Atenuante
⋮	⋮	
c_1	1	Neutro
⋮	⋮	Incremental
c_M	>1	

Fuente: Elaboración Propia

De igual manera se analiza la obtención de los indicadores de susceptibilidad física y operacional, de cada componente de la infraestructura hidráulica, así como los indicadores de resiliencia específica de cada tipología de amenaza vinculados a igualmente a cada componente básico de la infraestructura hidráulica.

- **Caracterización de la Infraestructura (Susceptibilidad y resiliencia).**

- **Indicadores de Susceptibilidad**

Los indicadores de susceptibilidad de la infraestructura representarían la fragilidad, de la misma referida a su caracterización física (de los componentes constitutivos y equipamiento específico), y su caracterización operacional (variables y parámetros de operación).

Éstos, fueron seleccionados entre otros, en base a diferentes postulados metodológicos incluidos en las referencias bibliográficas, así como del análisis comparativo de los mismos, obtenido en diferentes Sistemas de abastecimiento. Tanto la estructura como la asignación de rangos que se desarrolla se basan en el análisis de relaciones de dependencia y su afectación. La valoración de rangos y el peso de cada indicador se estiman en base a la experiencia, y se justifican mediante el Procedimiento de Análisis Jerárquico (PAJ).

La asignación de valores mínimos y máximos de los indicadores propuestos se realiza según la evolución de los parámetros de las diferentes variables de análisis que intervienen en la gestión del abastecimiento, el desarrollo tecnológico implantado y la tipología de gestión, de la Infraestructura. Para la asignación de rangos y valores se han revisado además diversas investigaciones, tales como (Liemberger R., 2007)

Inicialmente, los indicadores de susceptibilidad se definieron por su evolución temporal y su importancia en la operación del Sistema de abastecimiento, sobre todo por la frecuencia de generación de fallas (en tuberías, equipamiento de plantas elevadoras, equipamiento y elementos estructurales de estanques, captaciones, tratamiento de agua potable,...), así como el rendimiento técnico hidráulico, índice estructural de fugas, tipologías de mantenimiento, alternativas de suministro eléctrico horas de interrupción del servicio, nº clientes afectados, inspección de tuberías, limpieza de redes de alcantarillado,...).

En la selección inicial de las variables y de los parámetros constitutivos de los indicadores de susceptibilidad no se diferenciaba entre indicadores físicos y operacionales según los postulados de (Barbat & Cardona, 2003) pero es a partir de otras investigaciones como (SRM-LIFE, 2007), (FEMA-HAZUS, 2004), (Liemberger R., 2007), (Oliveira, Roca, & Goula, 2006), y otras.

La diferenciación de los rangos de dichos indicadores se ha planteado con una visión dinámica y holística del Sistema de abastecimiento y de depuración, en la que la fiabilidad de materiales, y equipamientos, la operación y continuidad del servicio, así como la eficiencia hídrica (Liemberger R., 2007) y energética se interrelacionan y se analiza su evolución temporal, priorizando unos indicadores sobre otros y descartando aquellos con escasa influencia en el Sistema.

A continuación, se muestra la Figura 4 de las familias de curvas de los indicadores de susceptibilidad (I_s) en base a la relación con los indicadores de resiliencia ($I_{\alpha i}$) y el índice de vulnerabilidad (V_i).

Familia de Curvas de Susceptibilidad (S_i)

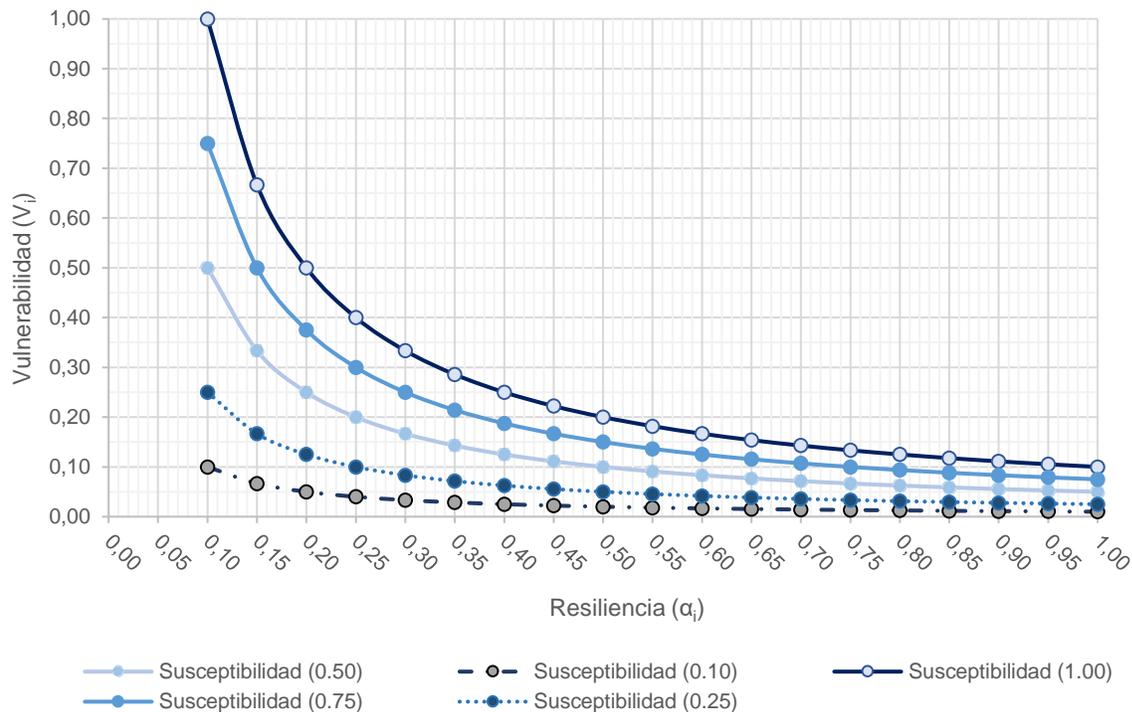


Figura 4 Familia de Curvas de Susceptibilidad (S_i). Fuente: Elaboración propia.

Con estas curvas o funciones matemáticas, se determina la evolución seguida por la vulnerabilidad según los valores de la susceptibilidad fijados (0, 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00) y la variación de los valores de la resiliencia entre 0.10 y 1.00.

- Indicadores de Resiliencia

Durante el inicio de la presente investigación los indicadores de resiliencia se englobaban en los indicadores de vulnerabilidad del Sistema, al igual que los ya expuestos indicadores de susceptibilidad. Es a partir del desarrollo de la investigación cuando se analizarían de forma independiente, aunque relacionada, incorporando además la vinculación de la resiliencia con las amenazas hidrológica y geológica.

Obtenida la resiliencia de amenaza específica de cada componente de la infraestructura hidráulica, se obtiene el indicador de resiliencia en función del rango de amenaza específica y los rangos de resiliencia específica. Dichos valores finales de los indicadores de resiliencia de cada componente de la infraestructura hidráulica definirían la obtención de la vulnerabilidad, así como la susceptibilidad de esta.

Resulta igualmente interesante, como aclaración, lo indicado en la Figura 5 donde, por el contrario se observa la evolución de la susceptibilidad, fijadas las familias de curvas de indicadores de resiliencia, obteniendo así los indicadores de susceptibilidad (I_s) y los índices de vulnerabilidad (V_i) correspondientes.

Familia de Curvas de Resiliencia (α_i)

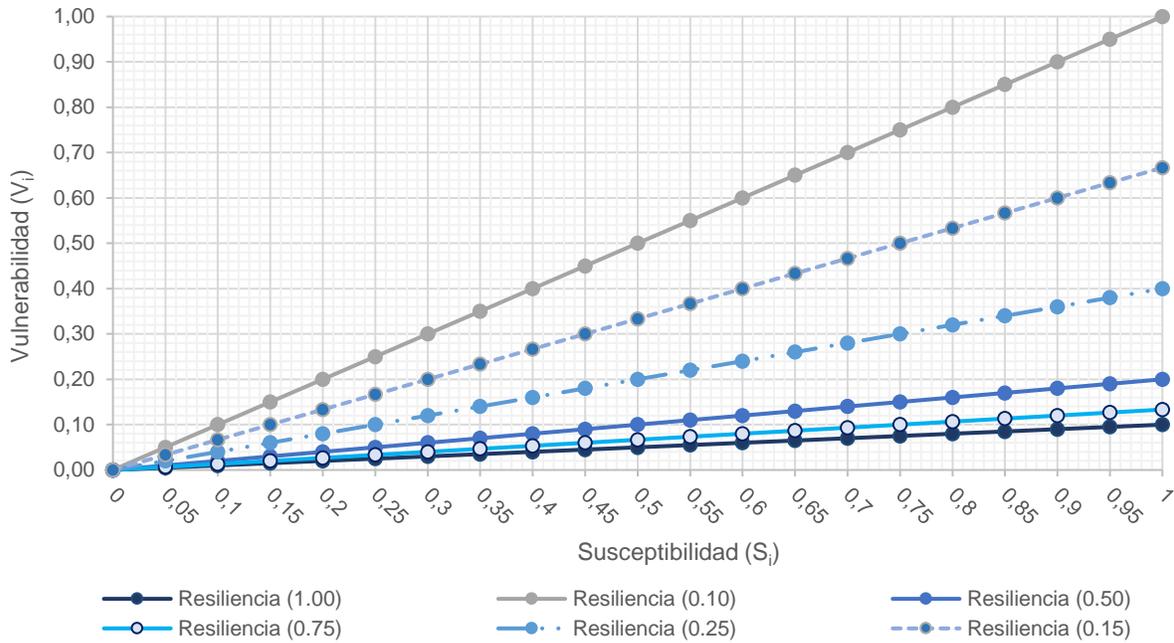


Figura 5 Familia de Curvas de Resiliencia (α). Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9 se presenta el método de cálculo de los indicadores de resiliencia ($I\alpha_{kil}$) en función de los rangos de amenaza (rm_{A_k}) e indicadores de resiliencia ($rn_{I\alpha_{kil}}$). Los valores de las amenazas k se pueden clasificar en rangos de intensidad, donde ($v0_{A_k}$) corresponde al menor valor esperado y (vm_{A_k}) al mayor valor esperado de la amenaza, con lo cual ($r1_{A_k}$) sería el rango menor y (rm_{A_k}) el rango mayor. De manera homóloga, los valores de los indicadores de resiliencia se pueden clasificar en rangos, donde ($v0_{I\alpha_{kil}}$) corresponde al menor valor del indicador de resiliencia y ($vn_{I\alpha_{kil}}$) corresponde al mayor valor del indicador de resiliencia, con lo cual ($r1_{I\alpha_{kil}}$) sería el rango menor y ($rn_{I\alpha_{kil}}$) el rango mayor. Luego, al combinar tanto el rango del indicador como el de la amenaza correspondiente se obtiene finalmente el indicador de resiliencia en dimensiones de [$Uc_k \cdot Daño^{-1}$], el cual toma en cuenta el valor asociado a la infraestructura i y al grado de afectación ante una amenaza k. Se observa en la tabla que, fijando una fila, a medida que uno se desplaza hacia la derecha el valor del indicador tendería a disminuir ($B \geq C$) y ($D \geq E$), debido a que, dado un rango de resiliencia, a mayor amenaza menor es mi capacidad de respuesta. Mientras que, fijando una columna, a medida que uno se desplaza hacia abajo el valor del indicador tendería a aumentar ($D \geq B$) y ($E \geq C$), debido a que, dado un rango de amenaza, a mayor resiliencia mayor es mi capacidad de respuesta.

Tabla 9 Cálculo del indicador en función de los rangos de amenaza e indicadores de resiliencia

Indicador de resiliencia ($I\alpha_{kil}$) [$Uc_k \cdot Da\tilde{n}o^{-1}$]			
Rango del indicador ($I\alpha_{kil}$)	Rango de la amenaza (A_k) [Uc_k]		
	$r1_{A_k} = [v0_{A_k}; v1_{A_k}]$...	$rm_{A_k} = [vm - 1_{A_k}; vm_{A_k}]$
$r1_{I\alpha_{kil}} = [v0_{I\alpha_{kil}}; v1_{I\alpha_{kil}}]$	B	...	C
⋮	⋮	⋮	⋮
$rn_{I\alpha_{kil}} = [vn - 1_{I\alpha_{kil}}; vn_{I\alpha_{kil}}]$	D	...	E

Fuente: Elaboración Propia.

- Indicadores Generales o de Sostenibilidad

Es a partir de un enfoque holístico de la vulnerabilidad y del riesgo, cuando se puede desarrollar una gestión eficiente y sostenible del recurso agua, siendo la infraestructura la Infraestructura Hidráulica Urbana, uno de los elementos fundamentales, Maskrey Andrew (1998), y Cardona O.D. (2001).

Se definen los indicadores de sostenibilidad como aquellos que caracterizan física y operacionalmente la infraestructura, aunque desde una perspectiva de eficiencia en su gestión, incrementando así la mejora de procesos y la adaptación al cambio climático.

Como se muestra en la presente investigación, parte de los indicadores incluidos en la caracterización de la vulnerabilidad de la Infraestructura hidráulica (susceptibilidad y resiliencia) estarían incluidos en la definición de Indicadores de Sostenibilidad.

Por lo que a partir de la definición de dichos indicadores representativos de la sostenibilidad de la infraestructura hidráulica se podría conocer además del grado de eficiencia en la operación y en los procesos, la evolución del riesgo, previendo incidencias y desarrollando la planificación de actuaciones encaminadas a disminuir la susceptibilidad de las infraestructuras hidráulicas críticas, incrementando así la resiliencia de los componentes de la infraestructura hidráulica, mitigando así las consecuencias adversas de la incidencia de las amenazas naturales (hidrológicas y geológicas) en dicha infraestructura crítica.

Manteniendo la definición de Sostenibilidad en base al Informe Brundtland (1987), se puede delimitar la misma en base a 5 tipos de indicadores, los tradicionales (ambientales, sociales, económicos), factor de gestión o estratégico, y grado de implantación de la resiliencia. Estos cinco tipos de factores, definidos por los indicadores propuestos, caracterizan la Sostenibilidad de la Infraestructura Hidráulica Urbana.

A continuación, se estructuran y enumeran los indicadores de gestión sostenible de las Infraestructuras descritas en los epígrafes anteriores, siendo éstos los indicadores que reflejan una gestión eficiente, y el desarrollo de las estrategias de Sustentabilidad del Sistema, y que están estrechamente relacionados con la continuidad del servicio, y la evolución de la resiliencia de aquellas (Infraestructuras Hidráulicas).

Tabla 10 Tipología de Indicadores de Sostenibilidad de la Infraestructura hidráulica.

Indicadores de Sostenibilidad	Coefficiente de participación	Clasificación	Valor del Indicador general
Indicadores ambientales	0,20	0 a 20	[0 a 100]
Indicadores sociales	0,20	0 a 20	[0 a 100]
Indicadores económicos	0,20	0 a 20	[0 a 100]
Indicadores de estrategia o de gestión	0,20	0 a 20	[0 a 100]
Indicadores de grado de implantación de la resiliencia	0,20	0 a 20	[0 a 100]

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 11 se enumeran los indicadores generales de resiliencia del componente a analizar de la Infraestructura hidráulica.

Tabla 11 Grado de implantación de la resiliencia en la Infraestructura hidráulica.
Indicadores generales de resiliencia. Rangos de valores.

Indicadores generales de la resiliencia	Rangos del Indicador de resiliencia
1. Monitorización de la Infraestructura hidráulica	1 a 10
2. Seguridad activa de las instalaciones	1 a 10
3. Seguridad procesos de gestión hidráulica	1 a 15
4. Equipos de especialistas con formación avanzada.	1 a 10
5. Implantación de dispositivos de alerta, control y regulación de procesos	1 a 15
6. Sistemas avanzados de ayuda a la toma de decisiones en tiempo real	1 a 15
7. Implantación de la gestión integral del Sistema.	1 a 15
8. Diseños avanzados y nuevos materiales avanzados	1 a 10

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se plantea una clasificación cualitativa de dicha implantación de la resiliencia, atendiendo a diferentes rangos de valores.

Tabla 12 Clasificación del grado de implantación de la resiliencia. Rango de valores.

Clasificación según grado de implantación de la resiliencia	Valor
Muy bajo	0-20
Bajo	21-40
Medio	41-60
Alto	61-80
Muy alto	81-100

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Análisis de amenazas

Con relación a las amenazas y en particular a la tipología de amenazas, éstas se pueden estructurar en “amenazas extrínsecas (peligros naturales)”, y “amenazas intrínsecas o en relación con la gestión del Sistema”. Las amenazas extrínsecas, en este caso las hidrológicas y las geológicas, son las que se analizan en la esta investigación, y son objeto de estudio específico.

Respecto a las amenazas intrínsecas, éstas se definen como aquellas generadas como consecuencia de una gestión anómala del Sistema de Infraestructuras hidráulicas, pudiendo clasificarse a su vez en internas y externas. Correspondiendo las internas, a aquellas generadas en la Infraestructura física por una inadecuada operación o gestión, y las externas a acciones humanas provenientes o causadas por agentes o personas ajenas al Sistema. Esta tipología de amenazas no será objeto de la presente investigación.

3.3.1. Amenazas Extrínsecas

En este epígrafe se busca definir y caracterizar las principales amenazas hidrológicas y geológicas zonales específicas que pudieran afectar la infraestructura hidráulica urbana, se muestra en una primera parte la amenaza hidrológica (crecidas e inundaciones) y en una segunda parte la amenaza geológica (remoción en masa, sísmica y volcánica). Cabe destacar que, en este estudio, un tipo de infraestructura hidráulica se vería amenazada siempre y cuando esta se encuentre emplazada en la zona de la amenaza correspondiente, con lo cual una infraestructura fuera de ésta tiene una amenaza esperada cercana a cero.

Estas amenazas se calculan mediante parámetros críticos, cuyo valor podría representar la esperanza de la amenaza, es decir la suma de las posibles intensidades ponderadas por su probabilidad, en función del período de retorno correspondiente. Luego este valor se podría ver modificado por los factores de peligro específicos que amplificarían o atenuarían la intensidad del parámetro crítico. Para cada factor de amenaza o peligro se dispondría de una relación entre sus diferentes clases (c_m) y los puntajes asignados a cada clase. Según la naturaleza del factor, este puede ser cuantitativo (ej: pendiente del terreno) o cualitativo (ej: tipo de suelo), con lo cual, la clase correspondiente sería un rango de valores (cuantitativo) o una característica del factor (cualitativo). En el caso en que el puntaje asignado sea mayor a 1, el factor sería incremental, mientras que, si es inferior a 1, el factor sería atenuante, tal como se presenta en la Tabla 13.

Tabla 13 Puntaje y rango de valores de los factores de amenaza.

Clases del Fp_{Hg} ($c_m(Fp_{Hg})$)	Puntaje asignado al Fp_{Hg}	Tipo de factor
c_0	0	Atenuante
⋮	⋮	
c_1	1	Neutro
⋮	⋮	Incremental
c_M	>1	

Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.1. Amenaza Hidrológica

En la ecuación (13) se presenta el detalle del cálculo de la amenaza hidrológica (A_H), en función del parámetro de peligro (amenaza) hidrológico crítico (Pp_H) y los factores de peligro hidrológico incidentes (Fp_{Hg}). Siendo A_{H0} la amenaza hidrológica umbral obtenida mediante el parámetro crítico propuesto. En relación con la amenaza hidrológica, se analizan los derivados de crecidas fluviales y nivales, así como las inundaciones por precipitaciones intensas. Se define como crecida o avenida fluvial, también llamada riada, al proceso natural, sin periodicidad, de fuerte impacto ambiental, constituido por un incremento importante y repentino de caudal en un sistema fluvial. Lleva consigo un ascenso del nivel de la corriente, que puede desbordar el cauce menor para ocupar progresivamente el cauce mayor, hasta alcanzar un máximo o punta de caudal (caudal-punta) y descender a continuación (Ollero Ojeda, 1996). Mientras que la inundación por precipitación es la acumulación de agua en el terreno luego de eventos de lluvia. Una tipología de infraestructura se vería amenazada ante un evento de crecida o inundación siempre y cuando se encuentre emplazada en una zona de amenaza hidrológica.

$$A_H[Uc_H] = Pp_H[Uc_H] \cdot \prod_{g=1}^{G(H)} Fp_{Hg} = A_{H0}[Uc_H] \cdot \prod_{g=1}^{G(H)} Fp_{Hg} \quad (13)$$

En cuanto a los parámetros de amenaza hidrológica, se tiene por una parte la altura máxima de agua (m), por otra parte, la velocidad máxima del flujo (m/s) y finalmente el caudal máximo de escorrentía (m³/s). En este estudio se contemplan como parámetros críticos la altura y la velocidad máxima del flujo, debido a que son, en general, los que se utilizan en el cálculo de la amenaza de crecida e inundación (PATRICOVA-Generalitat Valenciana, 2015).

En la Tabla 6 se presentan, los factores de amenaza hidrológica considerados en este estudio. Estos podrían eventualmente incidir en la "intensidad" del parámetro crítico, en este caso la velocidad y la altura máxima de escorrentía.

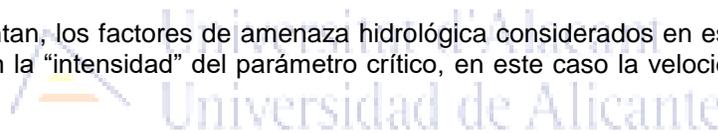


Tabla 14 Factores de amenaza hidrológica.

Denominación	Nombre del factor	Descripción
Fp_{H1}	Nivel freático	Profundidad de la napa subterránea, mide la capacidad de infiltración antes del encharcamiento.
Fp_{H2}	Tipo de terreno	La tipología del terreno contempla entre otros factores la impermeabilidad y la porosidad, determinando el coeficiente de escorrentía de la zona.
Fp_{H3}	Pendiente del terreno	La pendiente del terreno determina la altura y velocidad del escurrimiento.

Fuente: Elaboración Propia

La sensibilidad hidrológica superficial y subterránea, está caracterizada en otros factores, por las geoformas o relieve, la pendiente del terreno el régimen hídrico superficial o subterráneo y la geología del terreno, según las metodologías MLP o “Método La Plata” que analiza la sensibilidad hidrológica superficial y GOD para establecer la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos. (Hernández M. A. et al., 2009).

En este caso de la amenaza hidrológica, y atendiendo a las características hidrológicas zonales, se han seleccionado como factores relevantes, el nivel freático en relación con la capacidad de infiltración, la tipología de terreno con relación a su grado de impermeabilización y la pendiente topográfica, cuya parametrización se adjunta en la Tabla 15.

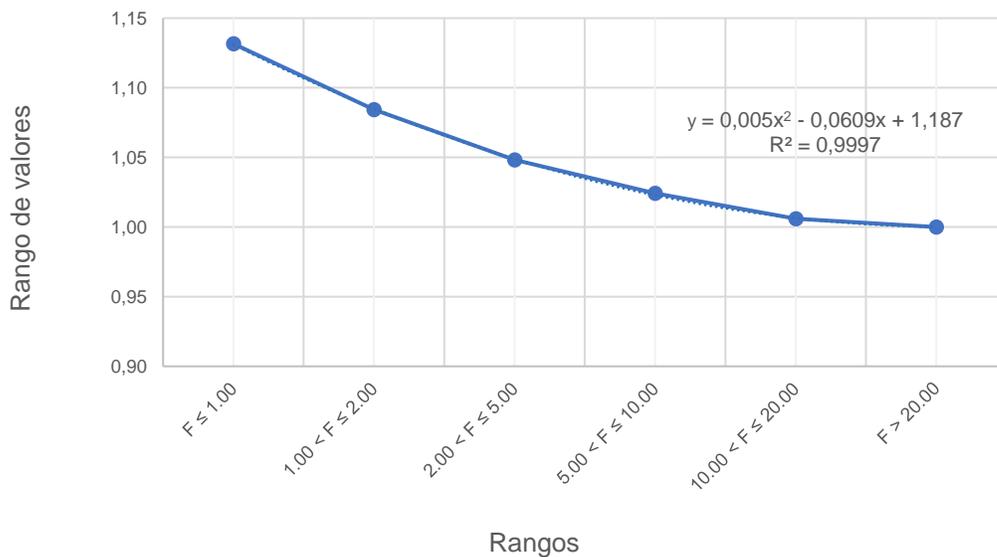
Tabla 15 Factores de amenaza hidrológica. Denominación, parámetros, rangos y valores.

Nivel freático, F (m)					
$F \leq 1.00$	$1.00 < F \leq 2.00$	$2.00 < F \leq 5.00$	$5.00 < F \leq 10.00$	$10.00 < F \leq 20.00$	$F > 20.00$
1.13	1.08	1.05	1.02	1.01	1.00
Tipo de terreno (Coeficiente Permeabilidad, K)					
Grava	Arena	Arena limosa	Limo	Arcilla	
$K > 0.10$	$0.10 \geq K > 0.001$	$0.001 \geq K > 10^{-5}$	$10^{-5} \geq K > 10^{-7}$	$K \leq 10^{-7}$	
1.00	1.02	1.03	1.05	1.08	
Coeficiente de escorrentía					
0,20 a 0,35	0,35 a 0,50	0,50 a 0,65	0,65 a 0,80	> 0,80	
1,00	1,02	1,06	1,12	1,20	
1,19	1,19	1,20	1,21	1,22	
1,00	1,01	1,02	1,04	1,06	

Fuente: Clasificación de Suelos AASHTO, y Elaboración propia.

A continuación, se adjuntan las funciones de distribución que definen la evolución de los valores y rangos estimados para cada factor de amenaza hidrológica.

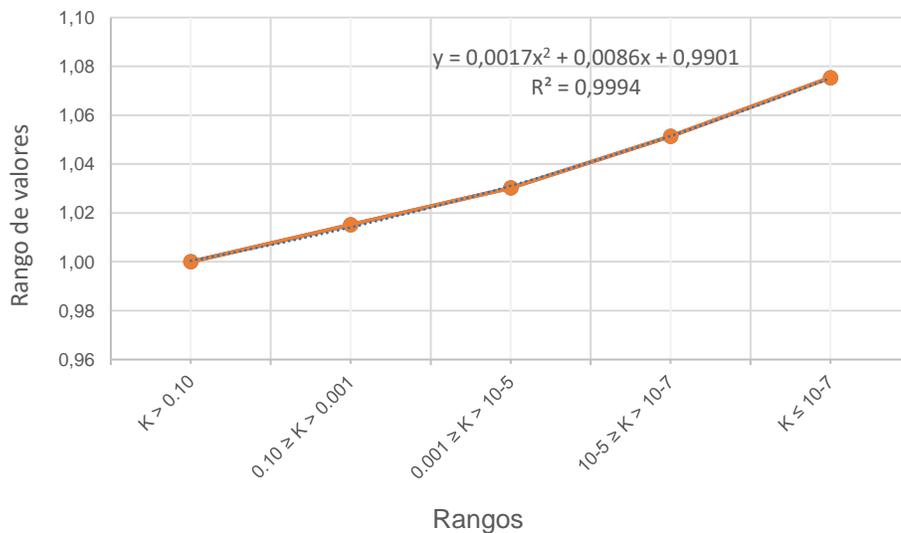
Gráfica 1 Representación de la evolución del factor de amenaza hidrológica:
Nivel freático, F (m).



Fuente: Elaboración propia.

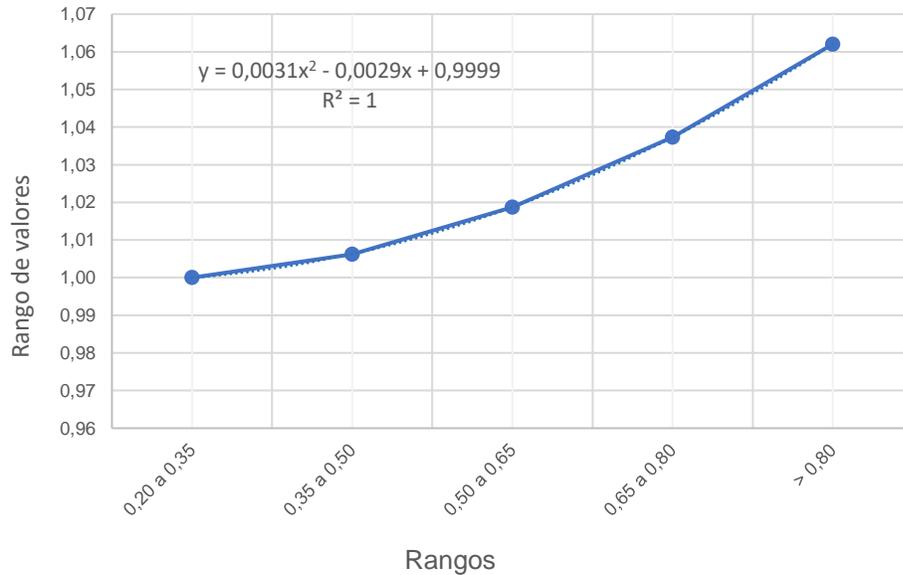


Gráfica 1 Representación de la evolución del factor de amenaza hidrológica:
Tipo de terreno, K.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 2 Representación de la evolución del factor de amenaza hidrológica:
Coeficiente escorrentía, Ce.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.2. Amenaza Geológica

Las amenazas geológicas más representativas analizadas en la presente investigación corresponden a la amenaza de remoción en masa, la amenaza sísmica y la amenaza volcánica, ya que, según la información recabada en las zonas de análisis, éstas generan o suponen un potencial elevado de generar daño sobre las infraestructuras hidráulicas.

Con relación a la geología de las zonas de estudio, éstas muestran una gran variabilidad según se ha podido constatar en las investigaciones analizadas.

A continuación, se adjuntan las tipologías de suelos y otras propiedades geológicas y geotécnicas del terreno según las normas NCh. 433, Eurocódigo-8 y RISMUR 2015.

Tabla 16 Clasificación de suelos según NCh 433.

Suelo tipo	Vs30 (m/s)	RQD	qu (MPa)	(N1) (golpes/pie)	Su (Mpa)
A	Roca, Suelo cementado	≥ 900	≥ 50%	≥ 10	-
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500	≥ 0,40	≥ 50	.
C	Suelo denso o firme	≥ 350	≥ 0,30	≥ 40	-
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180	-	≥ 30	≥ 0,05
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180	-	≥ 20	< 0,05

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 17 Perfil geológico, denominación de suelos y propiedades geotécnicas del terreno en la ciudad de Murcia. Área metropolitana.

Perfil geológico del terreno y caracterización geológica del Area metropolitana de Murcia						
Denominación de suelos	H (m)	Vs (m/s)	Densidad aparente Y(gr/cm3)	PGA ≤ 0.5	Tipo Terreno RISMUR 2015	Clasificación de Suelos Eurocódigo-8
Rellenos antrópicos	2,6	155	2	0,90	V	E
Limos y arcillas con proporción de arenas	10,6	260	1,99	1,00	IIIb	D
arenas	14,2	290	1,94	1,00	IIIb	D-C
gravas	30	465	2,45	1,00	IIIa	C

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.2.1. Amenaza de Remoción de masa

En la ecuación (14) se presenta el detalle del cálculo de la amenaza de remoción en masa (A_{RM}), en función del parámetro de peligro (amenaza) de remoción en masa crítico (Pp_{RM}) y los factores de peligro de remoción en masa incidentes (Fp_{RMg}). Siendo A_{RMO} la amenaza de remoción en masa umbral obtenida mediante el parámetro crítico propuesto. La remoción en masa es un proceso de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo o roca, de forma gravitacional (Varnes, Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control., 1978) Una tipología de infraestructura se vería amenazada ante un evento de remoción en masa siempre y cuando se encuentre emplazada en una zona de amenaza de remoción en masa.

$$A_{RM}[U_{CRM}] = Pp_{RM}[U_{CRM}] \cdot \prod_{g=1}^{G(RM)} Fp_{RMg} = A_{RMO}[U_{CRM}] \cdot \prod_{g=1}^{G(RM)} Fp_{RMg} \quad (14)$$

En cuanto a los parámetros de amenaza de remoción en masa se tiene, por una parte, el desprendimiento de roca, el cual se define como movimiento abrupto de bloques independientes de roca (Pierson, Janda, Thouret, & Borrero, 1990). Por otra parte, el flujo de detritos, el cual se define como movimientos continuos en el espacio, de masas de suelo (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios) o bloques rocosos (coladas de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua. El material está disgregado y se comporta como un fluido, donde las masas desplazadas son fuertemente deformadas internamente, sin presentar superficies de rotura definidas. El agua es el principal agente desencadenante, por la pérdida de resistencia a que da lugar en materiales poco cohesivos (Varnes, Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control., 1978) y (González de Vallejo, 2002)). Finalmente, el deslizamiento de suelo se define como movimientos continuos en el espacio, donde las superficies de ruptura no son preservadas, y las masas desplazadas son fuertemente deformadas internamente, comportándose de manera similar a un líquido viscoso (Varnes, Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control., 1978)

En este estudio se contemplan como parámetros críticos de amenaza de remoción en masa el flujo de detritos y el deslizamiento superficial, dada la recurrencia de estos eventos según (Campos, et al., 2005). En la Tabla 7 se presentan, los factores de amenaza de remoción en masa considerados en este estudio. Estos podrían eventualmente incidir en la "intensidad" del parámetro crítico, en este caso el flujo de detritos y el deslizamiento superficial.

Tabla 18 Factores de amenaza de remoción en masa.

Denominación	Nombre del factor	Descripción
$F_{p_{RM1}}$	Velocidad de deslizamiento vd (mm/s)	Define el movimiento del flujo de detritos que desliza según la pendiente topográfica y la densidad del material que desliza.
$F_{p_{RM2}}$	Intensidad de precipitación I (mm/h)	La intensidad de precipitación puede incrementar el peso específico del terreno susceptible a deslizamiento.
$F_{p_{RM3}}$	Coefficiente de escorrentía Ce	La cobertura vegetal del terreno afecta a la capacidad de infiltración del terreno, así como la velocidad de deslizamiento, la velocidad de desagüe, y otras magnitudes geológicas y geotécnicas del terreno.

Fuente: Elaboración Propia

Atendiendo a las recomendaciones de diversas investigaciones, entre las que se encuentran Lara M., (2007), Muñoz E., (2013), Vargas Cuervo, (2000), Varnes D.J., (1978a) y Olmos J., (2013), se proponen los siguiente rangos y valores de los factores de amenaza de remoción en masa, que se adjuntan en la Tabla 19.

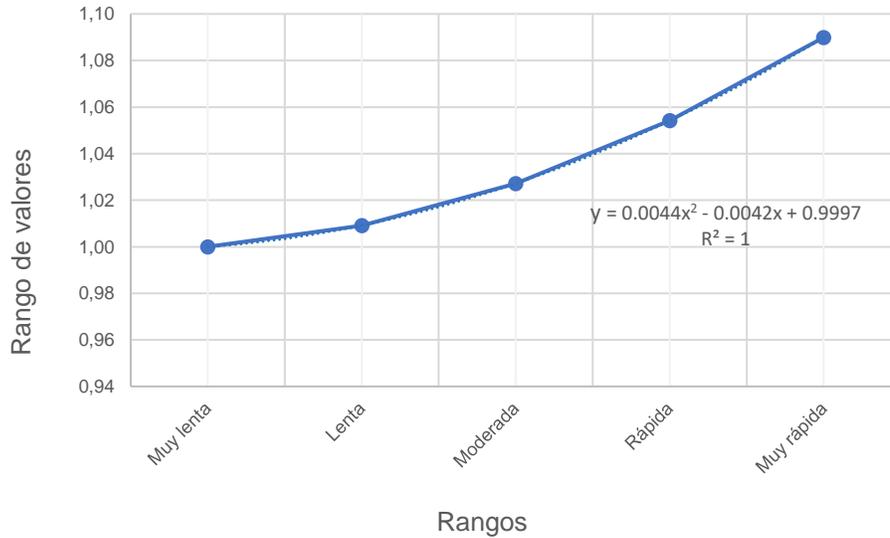
Tabla 19 Factores de remoción en masa. Denominación, parámetros, rangos y valores.

Velocidad de deslizamiento Vd (mm/s)					
Muy lenta	Lenta	Moderada	Rápida	Muy rápida	
$V < 0,005$ mm/s	$0,005 \text{ mm/s} < V \leq 0,05$ mm/s	$0,05 \text{ mm/s} < V \leq 0,50$ mm/s	$0,50 \text{ mm/s} < V \leq 50$ mm/s	$V > 50$ mm/s	
1.00	1.01	1.03	1.05	1.09	
Intensidad de precipitación I_{24} (mm)					
$I_{24} \leq 50$ mm	$50 \text{ mm} < I_{24} \leq 70$ mm	$70 \text{ mm} < I_{24} \leq 90$ mm	$100 \text{ mm} < I_{24} \leq 150$ mm	$150 \text{ mm} < I_{24} \leq 200$ mm	$I_{24} > 200$ mm
1.00	1.01	1.03	1.07	1.09	1.15
Pendiente, I (%)					
$I < 5$	$5 \leq I \leq 10$	$10 \leq I \leq 25$	$25 \leq I \leq 35$	> 35	
1,00	1,02	1,04	1,07	1,10	

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se adjuntan las funciones de distribución que definen la evolución de los valores y rangos estimados para cada factor de amenaza de Remoción en masa.

Gráfica 3 Representación de la evolución del factor de amenaza de remoción en masa:
Velocidad de deslizamiento, Vd. (mm/s)

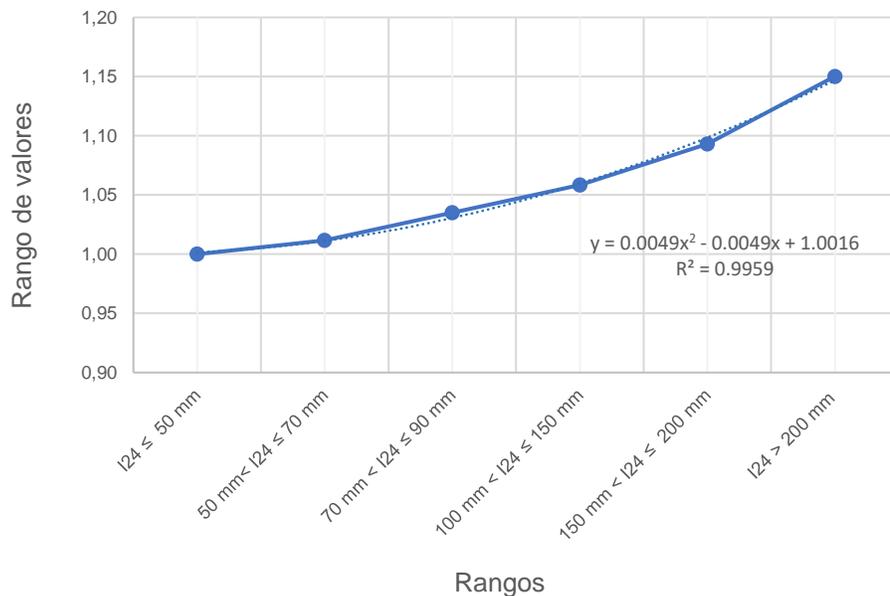


Fuente: Elaboración propia.



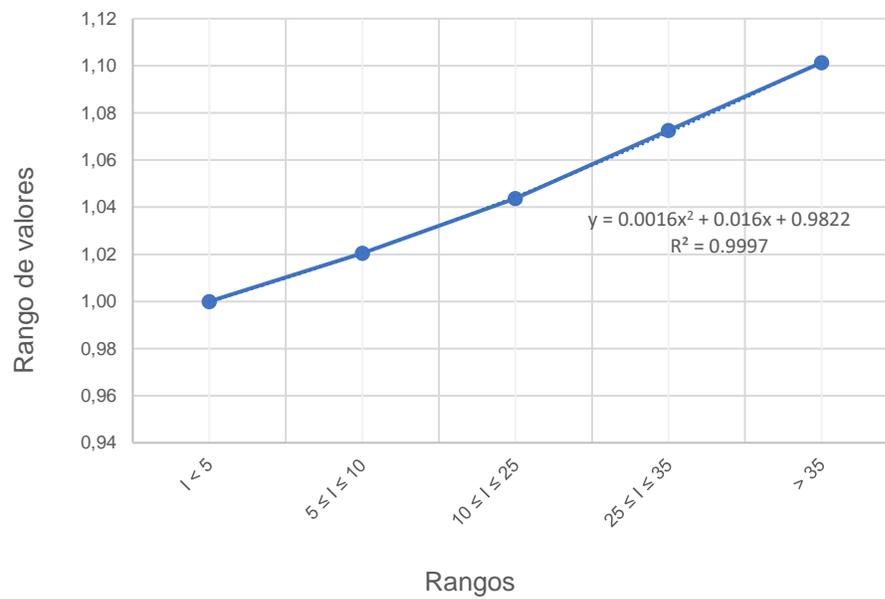
Universidad de Alicante
Universidad de Alicante

Gráfica 4 Representación de la evolución del factor de amenaza de remoción en masa:
Intensidad de Precipitación, I₂₄ (mm).



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 5 Representación de la evolución del factor de amenaza de remoción en masa:
Pendiente del terreno, I (%)



3.3.1.2.2. Amenaza Sísmica

En la ecuación (15) se presenta el detalle del cálculo de la amenaza sísmica (A_{SM}), en función del parámetro de peligro (amenaza) sísmico crítico (Pp_{SM}) y los factores de peligro sísmico incidentes (Fp_{SMg}). Siendo A_{SM0} la amenaza sísmica umbral obtenida mediante el parámetro crítico propuesto. Contemplando la definición de amenaza, se puede definir la amenaza sísmica como un fenómeno físico asociado a un sismo que tiene el potencial de producir un daño al sistema. Estos sismos pueden ser de distinto tipo: subducción (profundos), intraplaca (intermedios) y corticales (superficiales), siendo estos últimos los de mayor interés dada la proximidad a la superficie y su alta afectación a la infraestructura. Una tipología de infraestructura se vería amenazada ante un evento sísmico siempre y cuando se encuentre emplazada en una zona de amenaza de sismicidad.

$$A_{SM}[Uc_{SM}] = Pp_{SM}[Uc_{SM}] \cdot \prod_{g=1}^{G(SM)} Fp_{SMg} = A_{SM0}[Uc_{SM}] \cdot \prod_{g=1}^{G(SM)} Fp_{SMg} \quad (15)$$

En cuanto a los parámetros de amenaza sísmica se tiene, por una parte, la aceleración máxima del suelo (peak ground acceleration, PGA), la cual se define como la máxima aceleración del terreno, puede calcularse en función de su aceleración horizontal o vertical. Ésta se mide en % de la aceleración de gravedad, g (m/s²). Alguacil de la Blanca & Vidal Sánchez, (2012). Por otra parte, la velocidad máxima del suelo (peak ground velocity, PGV), la cual se define como la velocidad máxima del movimiento del terreno luego de un sismo, se mide en (cm/s), Alguacil de la Blanca & Vidal Sánchez, (2012). Finalmente, el desplazamiento máximo del Terreno (PGD), el cual se define como el máximo desplazamiento del terreno generado por la onda sísmica (PGD), se mide en metros (m).

En este estudio se contempla como parámetro crítico de amenaza sísmica la aceleración sísmica (PGA), dado que es el que eventualmente caracteriza los eventos de sismicidad en la zona de central de Chile (Silva, 2008). Como se ha indicado, en el análisis de la amenaza sísmica se incluye la tipología de sismos (corticales), que puede generar la Falla San Ramón, localizada en la Zona Oriental de Santiago, y cuya aplicación se incluye en el próximo informe. En la Tabla 8 se presentan, los factores de amenaza sísmica considerados en este estudio. Estos podrían eventualmente incidir en la "intensidad" del parámetro crítico, en este caso la aceleración sísmica.

Tabla 20 Factores de amenaza sísmica.

Denominación	Nombre del factor	Descripción
Fp_{SM1}	Resistencia del terreno.	La diferente resistencia del terreno (blando o duro) modifica la propagación de la onda sísmica. Siendo la afectación, mayor en suelos blandos.
Fp_{SM2}	Potencia de licuefacción de suelos.	Suelos especialmente susceptibles a la acción sísmica, comportándose como fluidos.
Fp_{SM3}	Variabilidad del perfil estratigráfico.	La diferencia de espesores y su naturaleza genera diferente comportamiento en la amplitud de la onda sísmica.

Fuente: Elaboración Propia

Como se ha indicado los factores de amenaza sísmica seleccionados se han estimado como mejores estimadores de la mayor o menor incidencia de este tipo de amenaza, y además en relación a la falla de San Ramón, por su proximidad al entorno urbano de la ciudad de Santiago, y según los estudios de Ferrando A.,(2014) y Vidal & Mardonez, (2011), la cercanía a fallas tectónicas produciría una serie de micro-vibraciones y tensiones que podrían causar un mayor grado de fracturación de los materiales basales.

En la Tabla 21, se proponen los siguientes rangos y valores de los factores de amenaza sísmica, que se consideran en esta investigación.

Tabla 21 Factores de amenaza sísmica. Denominación, parámetros, rangos y valores.

Tipología de suelo				
A	B	C	D	E
1.00	1.05	1.08	1.11	1.15
Resistencia del terreno o Tensión admisible del terreno q_c (kg/cm ²)				
0	0.25	0.5	0.75	1
$q_c < 60$	[60-70]	[120-135]	[180-200]	[220-250]

Fuente: NCh 433, (Zhou S., 1980)

Licuefacción de suelos				
Susceptibilidad a la licuefacción				
0	0.25	0.5	0.75	1
1.00	1.04	1.09	1.14	1.19

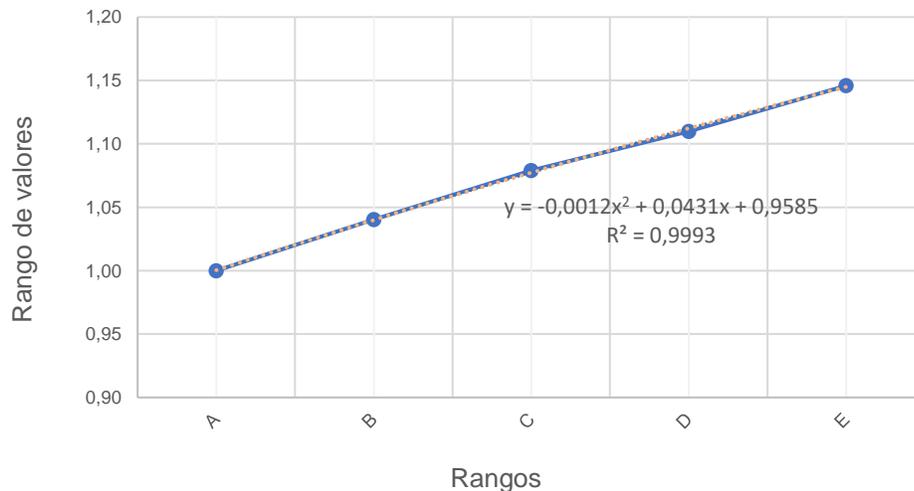
Fuente: Henríquez-Pantaleón, 2007

Variabilidad perfil estratigráfico				
0	0.25	0.5	0.75	1
1.00	1.03	1.06	1.08	1.11

Fuente: Elaboración propia.

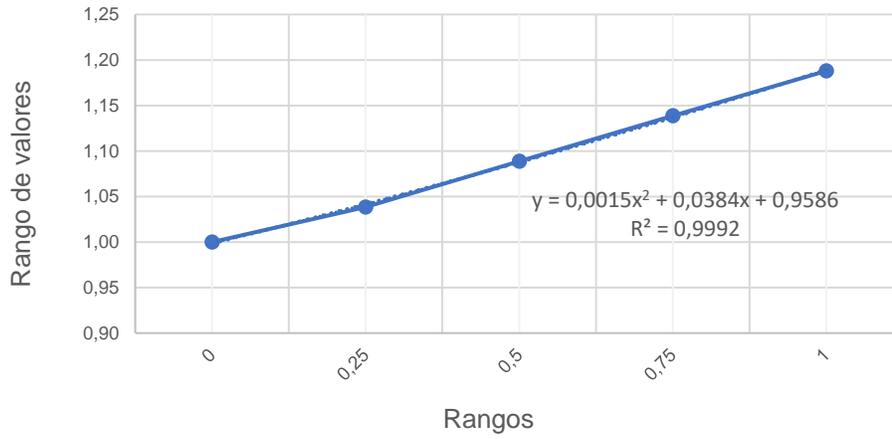
A continuación, se adjuntan las funciones de distribución que definen la evolución de los valores y rangos estimados para cada factor de amenaza Sísmica.

Gráfica 6 Representación de la evolución del factor de amenaza Sísmica: Tipología de Suelo, Resistencia mecánica del terreno, q_c (kg/cm²).



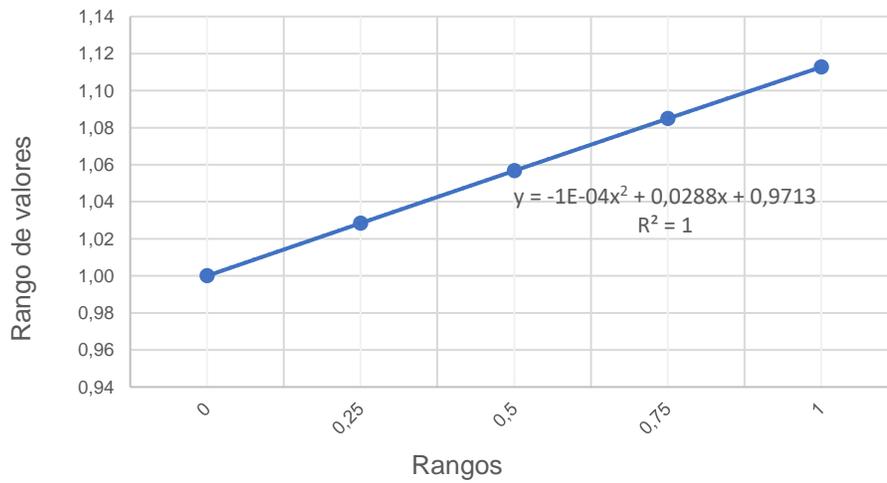
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 7 Representación de la evolución del factor de amenaza Sísmica:
Susceptibilidad a la licuefacción del terreno.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 8 Representación de la evolución del factor de amenaza Sísmica:
Variabilidad del perfil estratigráfico.



Fuente: Elaboración propia.

Según dichos estudios, si además de las afectaciones puntuales de los factores de amenaza sísmica definidos, se contempla la cercanía a la falla, la máxima fragilidad se produciría en la franja de los 100 a 200 metros lineales más próximos a la falla.

La amplificación cercana a la fuente depende en mayor medida, de la geología y de la topografía, y en menor medida de la tipología de suelo de la zona afectada.

Sin embargo, la amplificación de los efectos de la sismicidad generada por el terremoto "a grandes distancias", en mayor o menor grado depende de la impedancia de la estratificación, del tipo de suelo (susceptibilidad a la licuefacción de suelos), y del espesor del manto. Faccioli E. and Resendiz, (1976).

Tabla 22 Probabilidad de Inestabilidad del material basal según la cercanía a la falla tectónica.

Distancia a fallas tectónicas (m)	Probabilidad a disminuir la estabilidad del material basal en desprendimientos y deslizamientos
< 200	alta
≥ 200 y ≤ 600	media
< 600	baja

Fuente: Elaborada en base a Ferrando (1998, 2014) y Mardones y Vidal (2011)

Según Ferrando A., (2014) la cercanía a menos de 600 metros lineales provoca una mayor inestabilidad a los materiales existentes, quedando por sobre los 600 metros materiales más estables, lo cual concuerda con lo señalado por (Vidal & Mardonez, 2011), que indican que la máxima fragilidad se produce dentro de los 100 a 200 metros lineales.

No obstante, la licuefacción, es el factor de amenaza sísmica que es considerado como la principal causa de daño en la red de tuberías y de colectores durante un terremoto, según las investigaciones realizadas y la información histórica de eventos sísmicos AWWA, (1994), y Lara Yañez N.E., (2013).

3.3.1.2.3. Amenaza Volcánica

En la ecuación (16) se presenta el detalle del cálculo de la amenaza volcánica (A_V), en función del parámetro de peligro (amenaza) volcánico crítico (Pp_V) y los factores de peligro volcánico incidente (Fp_{Vg}). Siendo A_{V0} la amenaza volcánica umbral obtenida mediante el parámetro crítico propuesto. La amenaza volcánica se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento volcánico en un tiempo y área determinada, en función de la intensidad, magnitud y duración del evento SUBDERE, (2011). Una tipología de infraestructura se vería amenazada ante un evento volcánico siempre y cuando se encuentre emplazada en una zona de amenaza volcánica.

$$A_V[Uc_V] = Pp_V[Uc_V] \cdot \prod_{g=1}^{G(V)} Fp_{Vg} = A_{V0}[Uc_V] \cdot \prod_{g=1}^{G(V)} Fp_{Vg} \quad (16)$$

En cuanto a los parámetros de amenaza volcánica, se tiene por una parte la proyección de piroclastos, los cuales se definen como la acumulación superficial de material proveniente desde columnas eruptivas y penachos volcánicos, expulsado luego de una erupción volcánica. Compuesto, en general, por pómez o escorias y fragmentos de rocas. SERNAGEOMIN, (2018)

Por otra parte, el flujo piroclástico, el cual se define como nube o corriente densa formada por piroclastos y gases, que se desplaza por gravedad por las laderas de un volcán y principalmente a lo largo de depresiones topográficas. Se caracteriza por su alta temperatura (hasta 700°C) y alta velocidad (hasta 500 km/h), siendo altamente destructivo. La mayoría de los flujos piroclásticos se generan por el colapso de una columna eruptiva o por colapsos parciales de un domo en construcción. SERNAGEOMIN, (2018)

Finalmente, el flujo lahárico, el cual se define como mezcla de escombros rocosos movilizadas por agua, que fluyen rápidamente. Este se origina en las pendientes de los volcanes debido al derretimiento de la nieve o del glaciar por contacto con lava o por un flujo piroclástico. ONEMI, (2006).

En este estudio se contempla como parámetros de amenaza volcánica la proyección de piroclastos y el flujo lahárico, basándose en el estudio del volcán Villarrica, Aguilera Sáez, (2016), se determina que estos dos parámetros son críticos para calcular la amenaza volcánica. Se contemplan estos dos por separado debido a que el efecto de ellos sobre la infraestructura difiere luego de una erupción.

En la Tabla 23 se presentan, los factores de amenaza volcánica considerados en este estudio. Estos podrían eventualmente incidir en la "intensidad" del parámetro crítico, en este caso la proyección de piroclastos y el flujo lahárico.

Tabla 23 Factores de amenaza volcánica.

Denominación	Nombre del factor	Descripción
Fp_{V1}	Pendiente topográfica	La pendiente del terreno puede potenciar la generación y desplazamiento de lahares.
Fp_{V2}	Naturaleza fluvial del terreno.	Un terreno aluvial facilita la velocidad de desplazamiento del material volcánico expulsado.
Fp_{V3}	Cobertura vegetal del terreno	La cobertura vegetal varía la velocidad de deslizamiento de los lahares secundarios.

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se adjunta la parametrización de los factores de amenaza volcánica seleccionados, con los parámetros analizados Tabla 24.

Tabla 24 Factores de amenaza volcánica. Parámetros, rangos y valores.

Pendiente (I) (%)				
I < 5	5 ≤ I ≤ 10	10 ≤ I ≤ 25	25 ≤ I ≤ 35	> 35
1.00	1.02	1.05	1.09	1.16

Fuente: Fundamentos de hidrología de superficie, Limusa, México. Autor: Aparicio Francisco, 1999. Adaptada

Naturaleza fluvial terreno				
Tamaño partícula T (mm)				
Arena	Grueso	Medio	Fino	Arcilla
T > 0.06	0.06 ≥ T > 0.02	0.02 ≥ T > 0.006	0.006 ≥ T > 0.002	T ≤ 0.002
1.00	1.02	1.04	1.06	1.07

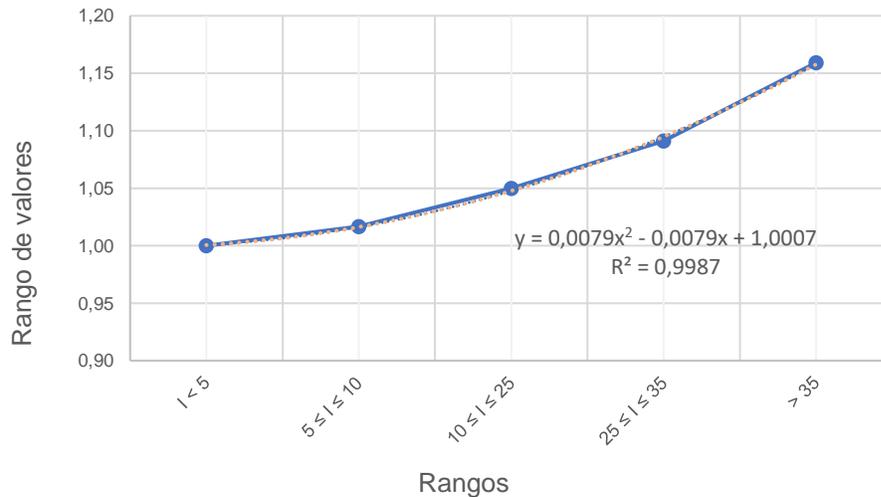
Fuente: Clasificación de Suelos DIN 4022

Cobertura vegetal del terreno (%)				
[0-19]	[20-39]	[40-59]	[60-79]	[80-100]
1.00	1.01	1.02	1.03	1.04

Fuente: Sánchez González, 2011. Adaptada

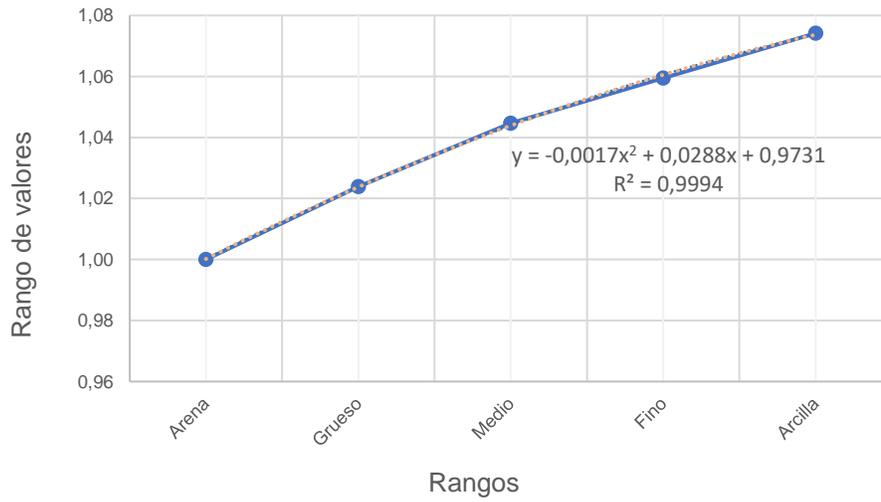
A continuación, se adjuntan las funciones de distribución que definen la evolución de los valores y rangos estimados para cada factor de amenaza Volcánica.

Gráfica 9 Representación de la evolución del factor de amenaza volcánica: Pendiente del terreno, I (%).



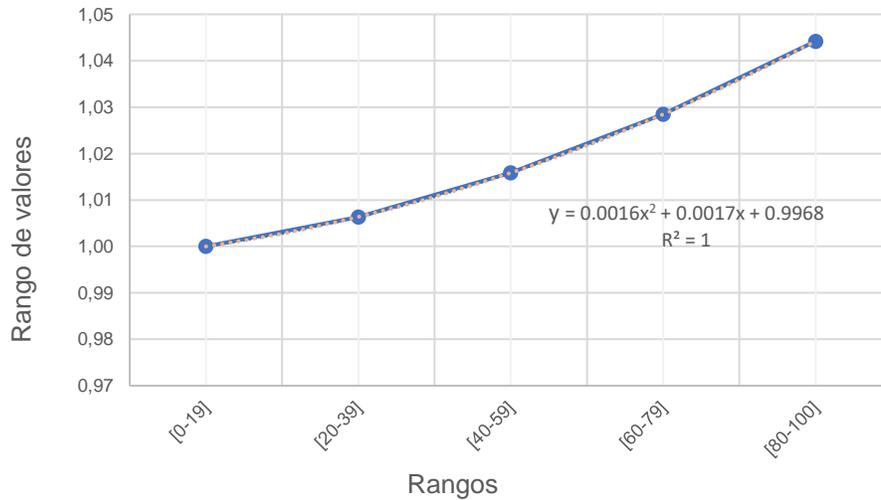
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 10 Representación de la evolución del factor de amenaza volcánica:
Naturaleza Fluvial del Terreno.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 11 Representación de la evolución del factor de amenaza volcánica:
Cobertura vegetal del Terreno (%).



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la presente investigación, los parámetros de amenaza volcánica más representativos seleccionados en base a la probabilidad de ocurrencia serían la formación de lahares y la caída de piroclastos, al igual que se contempla en las investigaciones desarrolladas por SERNAGEOMÍN para el caso del volcán Villarrica, como se ha indicado anteriormente.

Los factores de amenaza volcánica seleccionados que potenciarían el efecto de un episodio volcánico, serían la pendiente del terreno, la naturaleza fluvial del terreno y la cobertura vegetal del terreno, según se ha analizado de los postulados de las investigaciones consultadas. Sánchez González, (2011), Aguilera Sáez, (2016), y Pérez Contreras, (2012).



3.3.2. Amenazas Intrínsecas

La amenaza intrínseca, que se descomponen en amenaza física (A_{If}), la amenaza operacional (A_{Io}) y la amenaza de servicio (A_{Iserv}), se obtiene mediante la suma de los índices de los indicadores de cada tipología de amenaza (I_{AIf} , I_{AIo} y I_{AIserv}) ponderados, y corregidos según su criticidad relativa (δ_c) en relación al total del componente o Sistema de Infraestructuras, es decir,

$$A_{Ii} = A_{If} + A_{Io} + A_{Iserv} = \left(\sum w_f \cdot I_{AIf} + \sum w_o \cdot I_{AIo} + \sum w_{serv} \cdot I_{AIserv} \right)$$

$$A_I[Uc_I] = \sum A_I[Uc_I] = \sum A_{Ii}[Uc_I] + \sum A_{Ie}[Uc_I] = Pp_I[Uc_H] \cdot \prod_{g=1}^{G(I)} Fp_{Ig} \quad (17)$$

3.3.3. Caracterización de factores de amenaza: Rangos y valores.

La construcción y definición de los rangos, y valores de amenaza asignados, se han obtenido mediante las siguientes expresiones matemáticas, obteniendo una ecuación de evolución de cada uno de ellos.

Inicialmente a partir de los valores iniciales estimados, basados en las investigaciones analizadas que se adjuntan, y mediante la realización de correlaciones experimentales, para cada rango y factor de amenaza, se generan las siguientes expresiones:

$$F_{kn} = f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = A$$

$$F_{kn} = f_0(1) + \left(f_2 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = B$$

⋮

$$F_{kn} = f_0(1) + \left(f_n / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = N$$

A partir de estas expresiones se plantea una ecuación de evolución de los nuevos valores obtenidos (A, B, ..., N) para cada rango, mediante la siguiente expresión:

$$F_{kn} = \left(\text{Ln} \left(f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) \right) / f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) \right) + \left(f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) \right) / f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right)$$

Es decir,

$$F_{k1} = (\text{Ln}(A/A) + +(A/A))$$

$$F_{k2} = (\text{Ln}(B/A) + +(B/A))$$

⋮

$$F_{kn} = (\text{Ln}(N/A) + +(N/A))$$

Estas expresiones definirían los valores de los factores de amenaza específica de cada rango estimado, y su evolución.

La construcción y definición de los rangos y valores de amenaza se han obtenido mediante las siguientes expresiones matemáticas, obteniendo una ecuación de evolución de cada uno de ellos.

Inicialmente a partir de los valores iniciales estimados, basados en las investigaciones analizadas que se adjuntan, y mediante la realización de correlaciones experimentales, para cada rango y factor de amenaza, se generan las siguientes expresiones:

$$F_{pkn} = f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = A_{kn}$$

$$F_{pkn} = f_0(1) + \left(f_2 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = B_{kn}$$

⋮

$$F_{pkn} = f_0(1) + \left(f_n / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = N_{kn}$$

A partir de estas expresiones se plantea una ecuación de evolución de los nuevos valores obtenidos (A_{kn} , B_{kn}, \dots, N_{kn}) para cada rango, mediante la siguiente expresión:

$$F_{pkn} = \left(\text{Ln} \left(f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) / f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) \right) \right) + \left(f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) / f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) \right)$$

Es decir,



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

$$F_{pk1} = (\text{Ln}(A_{kn}/A_{kn}) + (A_{kn}/A_{kn}))$$

$$F_{pk2} = (\text{Ln}(B_{kn}/A_{kn}) + (B_{kn}/A_{kn}))$$

⋮

$$F_{pkn} = (\text{Ln}(N_{kn}/A_{kn}) + (N_{kn}/A_{kn}))$$

Estas expresiones definirían los valores de los factores de amenaza específica de cada rango estimado, y su evolución.

A continuación, se resumen los factores de amenaza específica, con indicación de rangos, ponderación y puntaje de estos, además de las principales referencias bibliográficas consultadas y las funciones de distribución en base a dichos rangos y valores indicados:

Tabla 25 Factores de amenaza hidrológica. Caracterización.

Factores de amenaza Hidrológica										
Denominación	Ponderación	Rangos y Puntajes						Referencias	Función de distribución	Gráfica
		r1	r2	r3	r4	r5	r6			
Nivel Freático, F (m.)	13%	1.00	1.01	1.02	1.05	1.08	1.13	Vergara, L. & Verdugo Ramón, 2015	$y = 0,005x^2 - 0,0609x + 1,187$ $R^2 = 0,9997$	Gráficas 1-3 Figura 31
								Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2010		
								-		
Tipo de terreno (Coef. Permeabilidad, K)	8%	1.00	1.02	1.03	1.05	1.08	-	Hernández, M.A. et. Al., 2009	$y = 0.0017x^2 + 0.0086x + 0.9901$ $R^2 = 0.9994$	Gráficas 1-3 Figura 31
								Ollero Ojeda, A., 1996		
								-		
Coef. de Escorrentía (Ce)	6%	1.00	1.01	1.02	1.04	1.06	-	PATRICOVA, 2015	$y = 0.0031x^2 - 0.0029x + 0.9999$ $R^2 = 1$	Gráficas 1-3 Figura 31
								Ollero Ojeda, A., 1997		
								Hernández, M.A. et. Al., 2009		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26 Factores de amenaza de Remoción en masa. Caracterización.

Factores de amenaza de Remoción en masa										
Denominación	Ponderación	Rangos y Puntajes						Referencias	Función de distribución	Gráfica
		r1	r2	r3	r4	r5	r6			
Velocidad de deslizamiento, Vd (mm/s)	9%	1.00	1.01	1.03	1.05	1.09	-	Lara, 2007	$y = 0.0044x^2 - 0.0042x + 0.9997$ $R^2 = 1$	Gráficas 4-6 Figura 32
								Muñoz, 2013		
								Vargas Cuervo, 2000		
Intensidad de Precipitación, I ₂₄ (mm)	15%	1.00	1.01	1.04	1.06	1.09	1.15	Lara, 2007	$y = 0.0049x^2 - 0.0049x + 1.0016$ $R^2 = 0.9959$	Gráficas 4-6 Figura 32
								Muñoz, 2013		
								Campos M., 2014		
Pendiente, I (%)	10%	1.00	1.02	1.04	1.07	1.10	-	Lara, 2007	$y = 0.0016x^2 + 0.016x + 0.9822$ $R^2 = 0.9997$	Gráficas 4-6 Figura 32
								Muñoz, 2013		
								Vargas Cuervo, 2000		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27 Factores de amenaza sísmica. Caracterización.

Factores de amenaza Sísmica									
Denominación	Ponderación	Rangos y Puntajes					Referencias	Función de distribución	Gráfica
		r1	r2	r3	r4	r5			
Tipología de Suelo (naturaleza y Resistencia del terreno)	15%	1.00	1.05	1.08	1.11	1.15	Alguacil de la Blanca & Vidal Sánchez, 2012	$y = -0.0012x^2 + 0.0431x + 0.9585$ $R^2 = 0.9993$	Gráficas 7-9 Figura 34
							Ferrando A., 2014		
							Vidal y Mardones, 2011		
Susceptibilidad a la licuefacción de Suelos	19%	1.00	1.04	1.09	1.14	1.19	Obando T.; 2009	$y = 0.0015x^2 + 0.0384x + 0.9586$ $R^2 = 0.9992$	
							Henríquez-Pantaleón, 2007		
							Zhous, 1980		
Variabilidad perfil estratigráfico	11%	1.00	1.03	1.06	1.08	1.11	Faccioli E. & Reséndiz, 1976	$y = -1E-04x^2 + 0.0288x + 0.9713$ $R^2 = 1$	
							AIWWA, 1994		
							Lara Yáñez N.E., 2013		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28 Factores de amenaza volcánica. Caracterización.

Factores de amenaza Volcánica										
Denominación	Ponderación	Rangos y Puntajes						Referencias	Función de distribución	Gráfica
		r1	r2	r3	r4	r5	r6			
Pendiente, I (%)	16%	1.00	1.02	1.05	1.09	1.16	-	SERNAGEOMÍN, 2018	$y = 0.0079x^2 - 0.0079x + 1.0007$ $R^2 = 0.9987$	Gráficas 10-12 Figura 35
								ONEMI, 2016		
								Aguilera Sáez, 2016		
Naturaleza Fluvial del terreno	7%	1.00	1.03	1.04	1.06	1.07	-	SERNAGEOMÍN, 2018	$y = -0.0017x^2 + 0.0288x + 0.9731$ $R^2 = 0.9994$	
								Sánchez González, 2011		
								Aguilera Sáez, 2016		
Cobertura del terreno	4%	1.00	1.01	1.02	1.03	1.94	-	Sánchez González, 2011	$y = 0.0016x^2 + 0.0017x + 0.9968$ $R^2 = 1$	
								SERNAGEOMÍN, 2018		
								Aguilera Sáez, 2016		

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Indicadores constitutivos de la vulnerabilidad de la Infraestructura hidráulica

3.4.1. Caracterización física y operacional de la infraestructura hidráulica

En este capítulo se busca caracterizar tanto física como operacionalmente la infraestructura hidráulica urbana del Sistema de abastecimiento y de depuración que se pretende analizar desde un enfoque de gestión del riesgo hidrológico y geológico. Es por ello, que en una primera parte se presentaría el sistema de abastecimiento y en una segunda parte el sistema de saneamiento, identificando sus distintos componentes. A continuación, se expone el caso de un sistema complejo (Aguas Andinas, Santiago de Chile).

3.4.1.1. Sistema de Abastecimiento

El sistema de abastecimiento de agua potable se divide en cuatro etapas principales: captación, transporte, producción y distribución a los usuarios. En la Figura 6 se presenta el diagrama de flujo de la tipología de abastecimiento al Gran Santiago junto con los grandes sistemas.

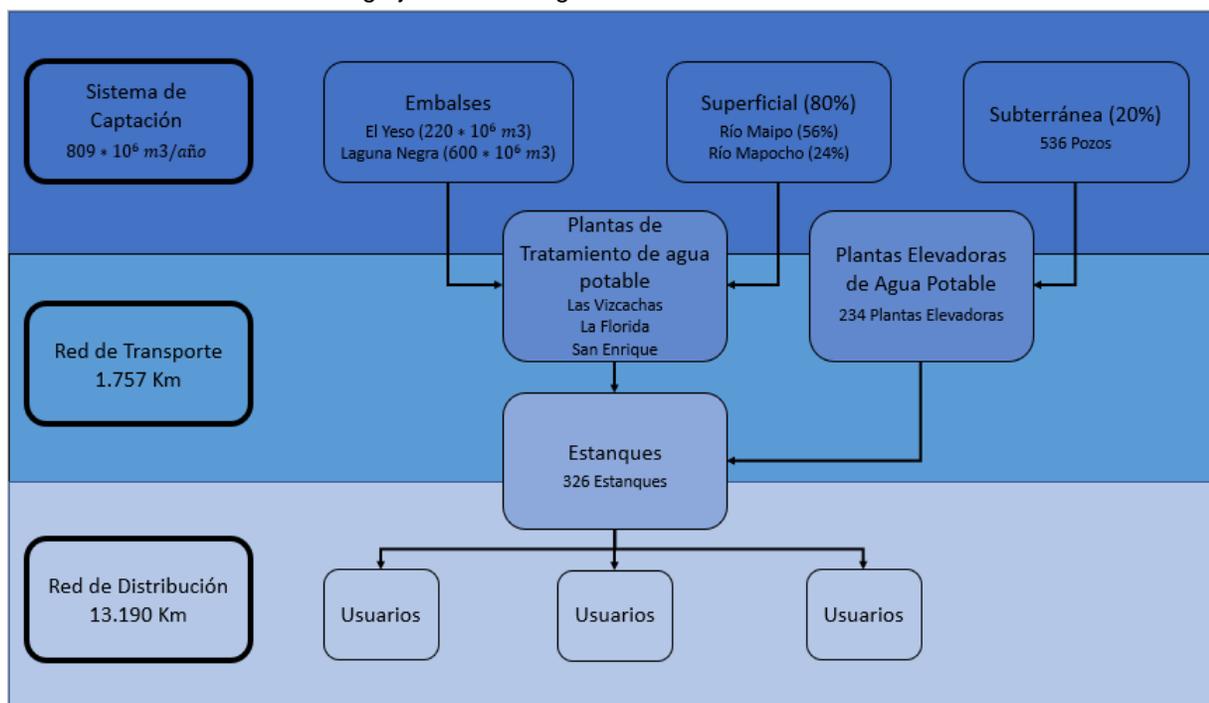


Figura 6 Diagrama de flujo del sistema de abastecimiento. Fuente: Elaboración Propia (2017)

Con respecto a la captación, esta se compone en un 80% de recursos hídricos superficiales (cuencas del río Maipo prioritariamente, y del río Mapocho, en menor medida), y en un 20% de aguas subterráneas como complemento a los recursos superficiales indicados. Las localidades, que se alimentan de manera autónoma, se abastecen mayormente de las aportaciones subterráneas. Las principales reservas de agua en el Gran Santiago son Laguna Negra, con una capacidad de 600 millones de m³ y el embalse El Yeso, con una capacidad de 220 millones de m³. Aguas Andinas contempla 23 plantas de tratamiento, dentro de las cuales las principales son: el complejo Las Vizcachas, La Florida y en menor medida la planta San Enrique. En el año 2016, el volumen de agua medido a la salida de las plantas de agua potable fue de 809 millones de metros cúbicos. El agua subterránea proveniente de los pozos se almacena en los estanques gracias a las plantas elevadoras de agua potable que permiten aumentar la presión del sector en caso de necesidad. La red de transporte desde el

tratamiento hasta los estanques tiene una longitud total de 1.757 km, Finalmente se contempla la red de distribución, abasteciendo directamente a los usuarios, con una longitud total de 13.190 km.

Desde el punto de vista operacional, la sectorización de cada sistema de distribución se estructura en base a la tipología de alimentación, ya que la mayoría de éstos se alimentan gravitacionalmente a partir de los estanques localizados a lo largo del trazado de los acueductos o aducciones que se encuentran en su mayoría en el borde precordillerano andino (zona oriental de la ciudad de Santiago), a cota más elevada. De esta forma, aprovechando la pendiente topográfica del terreno, se abastece desde los estanques, generalmente en dirección oriente – poniente, mediante las conducciones principales o “alimentadoras”.

Al contrario, la zona oriente de la Región Metropolitana, por su localización a cota superior en relación con los acueductos o aducciones precisa de redes impulsadas, por lo que se prevén las plantas elevadoras de agua potable. La zona nororiental, encuadrada en la zona de cordillera, presenta una variabilidad en su desarrollo urbano y una topografía característica, por lo que el diseño de la red de distribución se caracteriza por localizarse muy próxima a los mismos centros de producción de agua potable, y por lo tanto la longitud de la red de transporte es reducida. Sin embargo, en otros casos fue precisa la instalación de plantas elevadoras de agua potable por niveles de presión, además de la construcción de estanques de presión de reducida capacidad, lo que generó la configuración de pequeños sectores de distribución adaptados a la topografía y al desarrollo urbano precordillerano.

El suministro de agua potable en el ámbito del Grupo Aguas presenta más de 165 sectores hidráulicos, en los cuales se tienen las siguientes tipologías de infraestructuras al año 2017: 326 estanques, 234 plantas elevadoras de agua potable, 45 captaciones superficiales, 536 pozos de extracción de agua, 759,70 km de acueductos, y 23 plantas de tratamiento.

Las tipologías consideradas para el sistema de abastecimiento son las siguientes:

Acueductos (AC)

Captaciones Superficiales (CS)

Embalses (EMB)

Estanques (EST)

Plantas Elevadoras de agua potable (PEAP)

Plantas Tratamiento de agua potable (PTAP)

Pozos de captación (PC)

Red de Distribución (RD)

Red de Transporte (RT)



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.4.1.2. Sistema de Saneamiento

Respecto al sistema de depuración de Santiago, éste es de tipología separativa, en su mayor extensión, puesto que únicamente el núcleo urbano más antiguo del Gran Santiago, disponen de redes de alcantarillado unitarias, desde el punto de vista operacional el sistema de depuración se divide en macro cuencas, cuencas y subcuencas hidráulicas que abarcan una superficie próxima a los 720 Km². En la Figura 7 se presentan las zonas y áreas tributarias de aguas servidas, estas se dividen en tres principales para la ciudad de Santiago: Mapocho (AT-1, zona norte), Farfana (AT-2, zona centro) y Trebal (AT-3, zona sur).

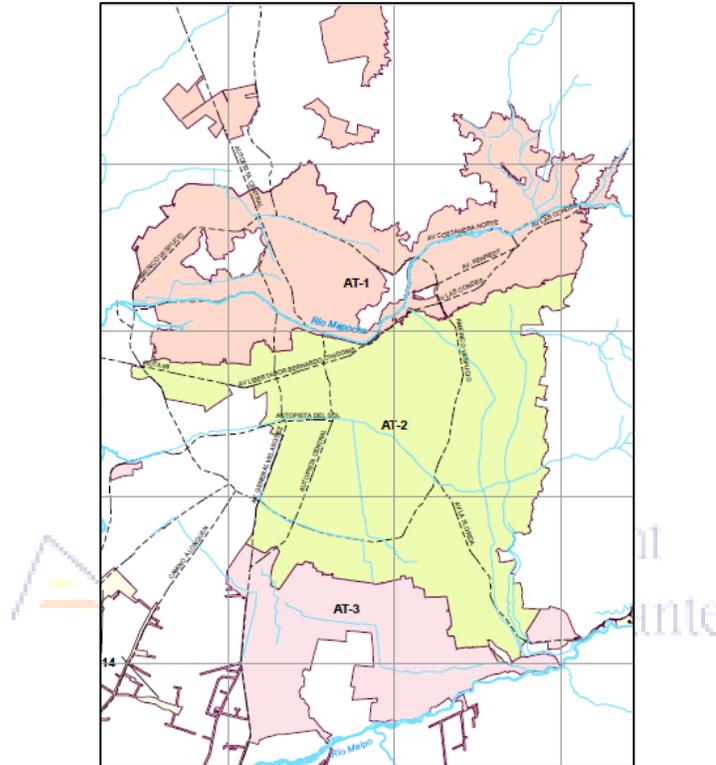


Figura 7 Zonas y áreas tributarias de aguas servidas. Fuente: Aguas Andinas (2013)

Este sistema presenta una longitud de la red de recolección de 10.705 km y un total de 37 plantas elevadoras de aguas servidas. En el año 2016, se trataron un total de 580,7 Hm³ aguas servidas con una capacidad de tratamiento de 18,4 m³/s, en donde las principales plantas de tratamiento de aguas servidas, ubicadas en el límite poniente de Santiago, la planta Farfana y el complejo Trebal- Mapocho contribuyeron en 283,5 y 209,2 Hm³ respectivamente, sumando entre las dos 85% del servicio. (Aguas Andinas, 2016). En la Figura 8 se presenta el esquema de los diferentes componentes y fases de operación, en donde se distinguen tres tipologías de infraestructuras principales: red de alcantarillado, plantas elevadoras de aguas servidas y plantas de tratamiento de aguas servidas.



Figura 8 Esquema de componentes y fases de operación del Sistema de Depuración.

Fuente: Elaboración propia.

Las tipologías consideradas para el sistema de depuración son las siguientes:

- Plantas Elevadoras de aguas servidas (PEAS)
- Plantas Tratamiento de aguas servidas (PTAS)
- Red de Alcantarillado (RAS)

En el siguiente capítulo se proponen los indicadores de susceptibilidad tanto física como operacional para cada uno de los componentes de los sistemas de abastecimiento y depuración considerados en este estudio.

Dichos indicadores propuestos, se han obtenido a partir de los valores de las variables representativas de la Infraestructura (físicas y operacionales) y la relación entre ellas, estableciendo de manera experimental rangos de variación, a partir de su evolución temporal y la tipología de gestión operativa efectuada. A partir de la caracterización de los indicadores y su análisis comparativo con otros sistemas de abastecimiento, e investigaciones específicas realizadas, se estructuran los mismos por tipología y criticidad en la operación del Sistema, y se seleccionan aquellos que se estiman más representativos planteando su análisis jerárquico (PAJ).

3.4.2. Indicadores de susceptibilidad de la infraestructura hidráulica

En la ecuación (18) se presenta la descomposición de la susceptibilidad de la infraestructura i (S_i), por una parte, la susceptibilidad física (S_f) y por otra parte la susceptibilidad operacional (S_o).

$$S_i [] = S_{f_i} [] + S_{o_i} [] \quad (18)$$

3.4.2.1. Indicadores físicos de susceptibilidad

En la ecuación (19) se presenta la susceptibilidad física de la infraestructura i (S_{f_i}), calculada como la suma ponderada ($W_{s_{f_{in}}}$) de los indicadores de susceptibilidad física de la infraestructura i ($I_{s_{f_{in}}}$). Para cada indicador de susceptibilidad física se dispondría de una relación entre los rangos ($r_m(I_{s_{f_{in}}})$) de posibles valores y los puntajes asignados a cada rango. En este caso el puntaje asignado varía entre 0 (susceptibilidad física nula) y 1 (susceptibilidad física máxima), tal como se presenta en la

Tabla 29.

$$S_{f_i} [] = \sum_{n=1}^{F_i} W_{s_{f_{in}}} \cdot I_{s_{f_{in}}} \quad (19)$$

Tabla 29 Rango y puntaje de valores de los indicadores de susceptibilidad física

Rango de valores de $I_{s_{f_{in}}}$ ($r_m(I_{s_{f_{in}}})$)	Puntaje asignado a $I_{s_{f_{in}}}$
$r_1 = [v_0; v_1]$	0
⋮	⋮
$r_M = [v_{M-1}; v_M]$	1

Fuente: Elaboración Propia

3.4.2.2. Indicadores operacionales de susceptibilidad

En la ecuación (20) se presenta la susceptibilidad operacional de la infraestructura i (So_i), calculada como la suma ponderada (Wso_{ij}) de los indicadores de susceptibilidad operacional de la infraestructura i (Iso_{ij}). Para cada indicador de susceptibilidad operacional se dispondría de una relación entre los rangos ($r_m(Iso_{ij})$) de posibles valores y los puntajes asignados a cada rango. En este caso el puntaje asignado varía entre 0 (susceptibilidad operacional nula) y 1 (susceptibilidad operacional máxima), tal como se presentan en la Tabla 30.

$$So_i[] = \sum_{j=1}^{o_i} Wso_{ij} \cdot Iso_{ij} \quad (20)$$

Tabla 30 Rango y puntaje de valores de los indicadores de susceptibilidad física

Rango de valores de Iso_{ij} ($r_m(Iso_{ij})$)	Puntaje asignado a Iso_{ij}
$r_1 = [v_0; v_1]$	0
⋮	⋮
$r_M =]v_{M-1}; v_M]$	1

Fuente: Elaboración Propia



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

En el anexo 7 se adjunta la caracterización de los Indicadores de susceptibilidad de los componentes del Sistema de Abastecimiento y del Sistema de Saneamiento.

3.4.3. Indicadores de resiliencia de la infraestructura hidráulica

En la ecuación (21) se presenta el detalle del cálculo de la resiliencia (α_{ki}) de cada infraestructura i frente a una amenaza k , los índices de resiliencia ($I\alpha_{kil}$) miden el daño provocado en la infraestructura dada, una “intensidad” de unidad crítica (Uc_k).

$$\alpha_{ki}[Uc_k \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{ki}} W\alpha_{kil} \cdot I\alpha_{kil} [Uc_k \cdot Daño^{-1}] \quad (21)$$

En la Tabla 31 se presenta el método de cálculo de los indicadores de resiliencia ($I\alpha_{kil}$) en función de los rangos de amenaza (rm_{A_k}) e indicadores de resiliencia ($rn_{I\alpha_{kil}}$). Los valores de las amenazas k se pueden clasificar en rangos de intensidad, donde ($v0_{A_k}$) corresponde al menor valor esperado y (vm_{A_k}) al mayor valor esperado de la amenaza, con lo cual ($r1_{A_k}$) sería el rango menor y (rm_{A_k}) el rango mayor. De manera homóloga, los valores de los indicadores de resiliencia se pueden clasificar en rangos, donde ($v0_{I\alpha_{kil}}$) corresponde al menor valor del indicador de resiliencia y ($vn_{I\alpha_{kil}}$) corresponde al mayor valor del indicador de resiliencia, con lo cual ($r1_{I\alpha_{kil}}$) sería el rango menor y ($rn_{I\alpha_{kil}}$) el rango mayor. Luego, al combinar tanto el rango del indicador como el de la amenaza correspondiente se obtiene finalmente el indicador de resiliencia en dimensiones de [$Uc_k \cdot Daño^{-1}$], el cual toma en cuenta el valor asociado a la infraestructura i y al grado de afectación ante una amenaza k . Se observa en la tabla que, fijando una fila, a medida que uno se desplaza hacia la derecha el valor del indicador tendería a disminuir ($B \geq C$) y ($D \geq E$), debido a que, dado un rango de resiliencia, a mayor amenaza menor es mi capacidad de respuesta. Mientras que, fijando una columna, a medida que uno se desplaza hacia abajo el valor del indicador tendería a aumentar ($D \geq B$) y ($E \geq C$), debido a que, dado un rango de amenaza, a mayor resiliencia mayor es mi capacidad de respuesta.

Tabla 31 Cálculo del indicador en función de los rangos de amenaza e indicadores de resiliencia

Indicador de resiliencia ($I\alpha_{kil}$) [$Uc_k \cdot Daño^{-1}$]			
Rango del indicador ($I\alpha_{kil}$)	Rango de la amenaza (A_k) [Uc_k]		
	$r1_{A_k} = [v0_{A_k}; v1_{A_k}]$...	$rm_{A_k} = [vm - 1_{A_k}; vm_{A_k}]$
$r1_{I\alpha_{kil}} = [v0_{I\alpha_{kil}}; v1_{I\alpha_{kil}}]$	B	...	C
⋮	⋮	⋮	⋮
$rn_{I\alpha_{kil}} = [vn - 1_{I\alpha_{kil}}; vn_{I\alpha_{kil}}]$	D	...	E

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 9 se presenta, de manera esquemática, la variación esperada de daño que tendría la infraestructura hidráulica ante un incremento de la resiliencia para un mismo rango de amenaza. En este ejemplo se contemplan tres rangos de amenaza sísmica, donde $r1$ representa un terremoto de mediana intensidad, $r2$ uno de intensidad alta y finalmente $r3$ uno de intensidad extrema y cuatro valores para el indicador de resiliencia, los que varían entre 0,1 y 0,7 con un incremento de 0,2. Se observa que a medida que aumenta el valor del indicador de resiliencia, el daño potencial disminuye, sin embargo, la variación marginal difiere para los tres rangos, siendo $r1$ el que presenta mayor cambio diferencial en función al indicador y $r3$ el menor.

Cabe destacar que el aumento del indicador de resiliencia conlleva tanto una disminución esperada del daño como un aumento en los costos, con lo cual hay que incorporar el concepto de beneficio marginal. Este se calcula mediante la diferencia entre el daño marginal esperado y el costo marginal de aumentar el indicador de

resiliencia en una determinada unidad. El beneficio marginal tendería a disminuir a medida que se aumenta el valor del indicador de resiliencia, debido que el daño evitado sería cada vez menor en comparación con el costo de incrementar la resiliencia. Se sugeriría analizar la evolución del beneficio marginal para cada indicador, para identificar en qué punto cambia de signo, representando este punto, el punto óptimo de resiliencia del sistema, en ese caso.

En términos generales, un sistema no podría ser completamente resiliente debido a que, ante una amenaza de intensidad extrema (r_3), su capacidad de respuesta se vería sobrepasada, independiente de las obras de mitigación contempladas.

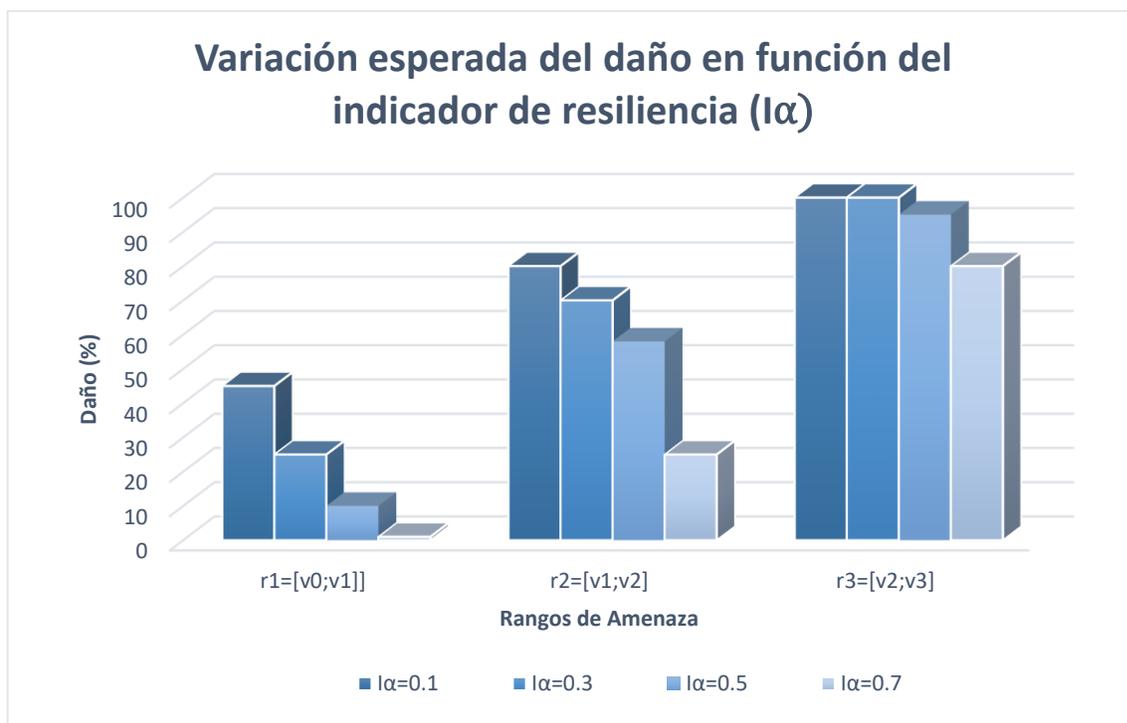


Figura 9 Ejemplo de la variación esperada del daño en función del indicador de resiliencia. Fuente: Elaboración Propia

3.4.3.1. Método de cálculo de los indicadores de resiliencia $I\alpha_{kil}$ en función de los rangos de amenaza rm_{A_k} y rangos de los indicadores de resiliencia $rn_{I\alpha_{kil}}$.

3.4.3.1.1. Resiliencia hidrológica

1.- Matriz de Indicadores de resiliencia (para Susceptibilidad total $S \leq 0.50$)

Cuando la suma de Indicadores de susceptibilidad, físico y operacional de la infraestructura que se analiza presenta un valor igual o inferior a 0.50, se emplean los valores de resiliencia que aparecen en la siguiente tabla.

Tabla 32 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza hidrológica (H). Valores máximos estimados.

Indicador de resiliencia Hidrológica (I_{Hi})					
Rangos del indicador de resiliencia	Rango de la amenaza Hidrológica				
	$r_{1A} < 0,30$	$0,30 \leq r_{2A} \leq 0,45$	$0,45 < r_{3A} \leq 0,60$	$0,60 < r_{4A} \leq 0,80$	$0,80 < r_{5A} \leq 1$
$0 \leq r_{1\alpha} \leq 0,15$	0.30	0.22	0.16	0.12	0.08
$0,15 < r_{2\alpha} \leq 0,25$	0.45	0.35	0.29	0.26	0.24
$0,25 < r_{3\alpha} \leq 0,40$	0.60	0.47	0.39	0.35	0.32
$0,40 \leq r_{4\alpha} \leq 0,55$	0.75	0.59	0.49	0.43	0.40
$0,55 \leq r_{4\alpha} \leq 0,70$	0.90	0.70	0.59	0.52	0.48
$0,70 \leq r_{4\alpha} \leq 0,85$	0.96	0.75	0.63	0.55	0.51
$0,85 \leq r_{5\alpha} \leq 1$	1.00	0.78	0.65	0.58	0.53

Fuente: Elaboración propia.

La matriz obtenida muestra los indicadores de resiliencia con la vinculación de la amenaza hidrológica, entrando con el indicador de amenaza hidrológica y el indicador de resiliencia de la infraestructura hidráulica i .

Dichos valores de resiliencia de la infraestructura i , estarán vinculados a la amenaza específica correspondiente, en este caso la amenaza hidrológica.

La obtención de los valores propuestos se desarrolla posteriormente, siguiendo una evolución definida mediante funciones de distribución.

2.- Matriz de Indicadores de resiliencia (para Susceptibilidad total $S > 0.50$)

En el supuesto de que el indicador de susceptibilidad total de la infraestructura analizada tenga un valor superior a 0.50, la tabla a utilizar es la siguiente con los valores de resiliencia corregidos mediante un coeficiente C_{rk} , que se analiza posteriormente.

Tabla 33 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza hidrológica (H) Valores mínimos estimados.

Indicador de resiliencia Hidrológica (I_{aH})						
Rangos de Indicadores de resiliencia	Indicador de resiliencia máxima ($I_{am\acute{a}x.}$)	Rango de la amenaza H				
		$r_{1A} < 0,30$	$0,30 \leq r_{2A} \leq 0,45$	$0,45 < r_{3A} \leq 0,60$	$0,60 < r_{4A} \leq 0,80$	$0,80 < r_{5A} \leq 1$
		$I_{AHm\acute{a}x} < 0.2499$	$I_{AHm\acute{a}x} = 0.45$	$I_{AHm\acute{a}x} = 0.60$	$I_{AHm\acute{a}x} = 0.80$	$I_{AHm\acute{a}x} = 1$
		0.30	0.45	0.60	0.80	1.00
$0 \leq r_{1\alpha} \leq 0,15$	0.15	0.15	0.13	0.12	0.10	0.08
$0,15 < r_{2\alpha} \leq 0,25$	0.25	0.28	0.22	0.18	0.16	0.15
$0,25 < r_{3\alpha} \leq 0,40$	0.40	0.46	0.36	0.30	0.27	0.24
$0,40 \leq r_{4\alpha} \leq 0,55$	0.55	0.61	0.48	0.40	0.35	0.33
$0,55 \leq r_{4\alpha} \leq 0,70$	0.70	0.78	0.61	0.51	0.45	0.41
$0,70 \leq r_{4\alpha} \leq 0,85$	0.85	0.87	0.68	0.57	0.50	0.46
$0,85 \leq r_{5\alpha} \leq 1$	0.95	0.95	0.74	0.62	0.55	0.50

Fuente: Elaboración propia.

Esta matriz al igual que la anterior, muestra los indicadores de resiliencia con la vinculación de la amenaza hidrológica, entrando con el indicador de amenaza hidrológica y el indicador de resiliencia de la infraestructura hidráulica i.

Dichos valores de resiliencia de la infraestructura i, estarán vinculados a la amenaza específica correspondiente, en este caso la amenaza hidrológica.

3.4.3.1.2. Resiliencia de Remoción en Masa

1.- Matriz de Indicadores de resiliencia (para Susceptibilidad total $S \leq 0.50$)

Cuando la suma de Indicadores de susceptibilidad, físico y operacional de la infraestructura que se analiza presenta un valor igual o inferior a 0.50, se emplean los valores de resiliencia que aparecen en la siguiente tabla.

Tabla 34 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza de remoción en masa (RM) Valores máximos estimados.

Indicador de resiliencia Remoción en Masa ($I_{\alpha RM}$)				
Rangos del indicador de resiliencia	Rango de la amenaza RM			
	$r_{1A} < 0,25$	$0,25 \leq r_{2A} \leq 0,50$	$0,50 < r_{3A} \leq 0,75$	$0,75 < r_{4A} \leq 1$
$0 \leq r_{1\alpha} \leq 0,15$	0,30	0,19	0,11	0,04
$0,15 < r_{2\alpha} \leq 0,25$	0,45	0,36	0,33	0,31
$0,25 < r_{3\alpha} \leq 0,40$	0,60	0,49	0,43	0,42
$0,40 \leq r_{4\alpha} \leq 0,55$	0,75	0,61	0,54	0,52
$0,55 \leq r_{4\alpha} \leq 0,70$	0,90	0,73	0,65	0,63
$0,70 \leq r_{4\alpha} \leq 0,85$	0,96	0,78	0,70	0,67
$0,85 \leq r_{5\alpha} \leq 1$	1,00	0,81	0,72	0,70

Fuente: Elaboración propia.

La matriz obtenida muestra los indicadores de resiliencia con la vinculación de la amenaza de remoción en masa entrando con el indicador de amenaza hidrológica y el indicador de resiliencia de la infraestructura hidráulica i. Dichos valores de resiliencia de la infraestructura i, estarán vinculados a la amenaza específica correspondiente, en este caso la amenaza de remoción en masa.

La obtención de los valores propuestos se desarrolla posteriormente, siguiendo una evolución definida mediante funciones de distribución.

2.- Matriz de Indicadores de resiliencia (para Susceptibilidad total $S > 0.50$)

En el supuesto de que el indicador de susceptibilidad total de la infraestructura analizada tenga un valor superior a 0.50, la tabla a utilizar es la siguiente con los valores de resiliencia corregidos mediante un coeficiente C_{rk} , que se analiza posteriormente.

Tabla 35 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza de remoción en masa (RM). Valores mínimos estimados.

Indicador de resiliencia Remoción en Masa ($I_{\alpha RM}$)					
Rangos de Indicadores de resiliencia	Indicador de resiliencia máxima ($I_{\alpha máx.}$)	Rango de la amenaza RM			
		$r_{1A} < 0,25$	$0,25 \leq r_{2A} \leq 0,50$	$0,50 < r_{3A} \leq 0,75$	$0,75 < r_{4A} \leq 1$
		$I_{\alpha RM máx.} < 0.2499$	$I_{\alpha RM máx.} = 0.50$	$I_{\alpha RM máx.} = 0.75$	$I_{\alpha RM máx.} = 1$
		0.25	0.50	0.75	1.00
$0 \leq r_{1\alpha} \leq 0,15$	0,15	0,15	0,11	0,08	0,04
$0,15 < r_{2\alpha} \leq 0,25$	0,25	0,28	0,23	0,20	0,20
$0,25 < r_{3\alpha} \leq 0,40$	0,40	0,46	0,37	0,33	0,32
$0,40 \leq r_{4\alpha} \leq 0,55$	0,55	0,61	0,50	0,45	0,43
$0,55 \leq r_{4\alpha} \leq 0,70$	0,70	0,78	0,63	0,57	0,54
$0,70 \leq r_{4\alpha} \leq 0,85$	0,85	0,87	0,71	0,63	0,61
$0,85 \leq r_{5\alpha} \leq 1$	0,95	0,95	0,77	0,69	0,66

Fuente: Elaboración propia.

La matriz obtenida muestra los indicadores de resiliencia con la vinculación de la amenaza de remoción en masa, entrando con el indicador de amenaza de remoción en masa y el indicador de resiliencia de la infraestructura hidráulica i . Tabla 34.

Dichos valores de resiliencia de la infraestructura i , estarán vinculados a la amenaza específica correspondiente, en este caso la amenaza de remoción en masa.

La obtención de los valores propuestos se desarrolla posteriormente, siguiendo una evolución definida mediante funciones de distribución. Tabla 35.

3.4.3.1.3. Resiliencia Sísmica

1.- Matriz de Indicadores de resiliencia (para Susceptibilidad total $S \leq 0.50$)

Cuando la suma de Indicadores de susceptibilidad, físico y operacional de la infraestructura que se analiza presenta un valor igual o inferior a 0.50, se emplean los valores de resiliencia que aparecen en la siguiente tabla.

Tabla 36 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza sísmica (SM). Valores máximos estimados.

Indicador de resiliencia sísmica ($I_{\alpha SM}$)					
Rangos del indicador de resiliencia	Rango de la amenaza PGA (%)				
	$r_{1\alpha} < 26$	$26 \leq r_{2\alpha} \leq 37$	$37 < r_{3\alpha} \leq 47$	$47 < r_{4\alpha} \leq 58$	$58 < r_{5\alpha} \leq 70$
$0 \leq r_{1\alpha} \leq 0,15$	0.30	0.21	0.14	0.09	0.04
$0,15 < r_{2\alpha} \leq 0,25$	0.45	0.36	0.31	0.28	0.27
$0,25 < r_{3\alpha} \leq 0,40$	0.60	0.48	0.41	0.38	0.36
$0,40 \leq r_{4\alpha} \leq 0,55$	0.75	0.60	0.52	0.47	0.45
$0,55 \leq r_{4\alpha} \leq 0,70$	0.90	0.72	0.62	0.57	0.54
$0,70 \leq r_{4\alpha} \leq 0,85$	0.96	0.76	0.66	0.60	0.58
$0,85 \leq r_{5\alpha} \leq 1$	1.00	0.80	0.69	0.63	0.60

Fuente: Elaboración propia.

2.- Matriz de Indicadores de resiliencia (para Susceptibilidad total $S > 0.50$)

En el supuesto de que el indicador de susceptibilidad total de la infraestructura analizada tenga un valor superior a 0.50, la tabla a utilizar es la siguiente con los valores de resiliencia corregidos mediante un coeficiente C_{rk} , que se analiza posteriormente.

Tabla 37 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza sísmica (SM). Valores mínimos estimados.

Indicador de resiliencia Sísmica ($I_{\alpha SM}$)						
Rangos de Indicadores de resiliencia	Indicador de resiliencia máxima ($I_{\alpha máx.}$)	Rango de la amenaza Sísmica PGA (%)				
		$r_{1A} < 26$	$26 \leq r_{2A} \leq 37$	$37 < r_{3A} \leq 47$	$47 < r_{4A} \leq 58$	$58 < r_{5A} \leq 70$
		$I_{ASM máx} < 0.1999$	$I_{ASM máx} = 0.40$	$I_{ASM máx} = 0.60$	$I_{ASM máx} = 0,80$	$I_{ASM máx} = 1$
$0 \leq r_{1\alpha} \leq 0,15$	0.15	0.20	0.15	0.10	0.08	0.06
$0,15 < r_{2\alpha} \leq 0,25$	0.25	0.28	0.22	0.19	0.18	0.17
$0,25 < r_{3\alpha} \leq 0,40$	0.40	0.46	0.37	0.32	0.29	0.28
$0,40 \leq r_{4\alpha} \leq 0,55$	0.55	0.61	0.49	0.42	0.39	0.37
$0,55 \leq r_{4\alpha} \leq 0,70$	0.70	0.78	0.62	0.54	0.49	0.47
$0,70 \leq r_{4\alpha} \leq 0,85$	0.85	0.87	0.69	0.60	0.55	0.53
$0,85 \leq r_{5\alpha} \leq 1$	0.95	0.95	0.76	0.65	0.60	0.58

Fuente: Elaboración propia.

La matriz obtenida muestra los indicadores de resiliencia con la vinculación de la amenaza sísmica, entrando con el indicador de amenaza sísmica y el indicador de resiliencia de la infraestructura hidráulica i . Tabla 36.

Dichos valores de resiliencia de la infraestructura i , estarán vinculados a la amenaza específica correspondiente, en este caso la amenaza sísmica.

La obtención de los valores propuestos se desarrolla posteriormente, siguiendo una evolución definida mediante funciones de distribución.



3.4.3.1.4. Resiliencia Volcánica

1.- Matriz de Indicadores de resiliencia (para Susceptibilidad total $S \leq 0.50$)

Cuando la suma de Indicadores de susceptibilidad, físico y operacional de la infraestructura que se analiza presenta un valor igual o inferior a 0.50, se emplean los valores de resiliencia que aparecen en la siguiente tabla.

Tabla 38 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza volcánica (V). Valores máximos estimados.

Indicador de resiliencia Volcánica ($I_{\alpha V}$)					
Rangos del indicador de resiliencia	Rango de la amenaza volcánica				
	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	$0 \leq r_{1A} < 4$	$4 \leq r_{2A} \leq 8$	$8 < r_{3A} \leq 12$	$12 < r_{4A} \leq 16$	$16 < r_{5A} \leq 20$
$0 \leq r_{1\alpha} \leq 0,15$	0,30	0,23	0,18	0,14	0,11
$0,15 < r_{2\alpha} \leq 0,25$	0,45	0,35	0,28	0,24	0,22
$0,25 < r_{3\alpha} \leq 0,40$	0,60	0,46	0,38	0,33	0,29
$0,40 \leq r_{4\alpha} \leq 0,55$	0,75	0,58	0,47	0,41	0,36
$0,55 \leq r_{4\alpha} \leq 0,70$	0,90	0,69	0,57	0,49	0,44
$0,70 \leq r_{4\alpha} \leq 0,85$	0,96	0,74	0,61	0,52	0,46
$0,85 \leq r_{5\alpha} \leq 1$	1,00	0,77	0,63	0,54	0,48

Fuente: Elaboración propia.

2.- Matriz de Indicadores de resiliencia (para Susceptibilidad total $S > 0.50$)

En el supuesto de que el indicador de susceptibilidad total de la infraestructura analizada tenga un valor superior a 0.50, la tabla a utilizar es la siguiente con los valores de resiliencia corregidos mediante un coeficiente C_{rk} , que se analiza posteriormente.

Tabla 39 Indicadores y rangos de resiliencia vinculados a la amenaza volcánica (V). Valores mínimos estimados.

Indicador de resiliencia Volcánica ($I_{\alpha V}$)						
Rangos de Indicadores de resiliencia	Indicador de resiliencia máxima ($I_{\alpha máx.}$)	Rango de la amenaza Volcánica				
		$r_{1A} < 4$	$4 \leq r_{2A} \leq 8$	$8 < r_{3A} \leq 12$	$12 < r_{4A} \leq 16$	$16 < r_{5A} \leq 18$
		$I_{AV máx.} = 0.1999$	$I_{AV máx.} = 0.40$	$I_{AV máx.} = 0.60$	$I_{AV máx.} = 0.80$	$I_{AV máx.} = 1$
$0 \leq r_{1\alpha} \leq 0,15$	0.15	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
$0,15 < r_{2\alpha} \leq 0,25$	0.25	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11
$0,25 < r_{3\alpha} \leq 0,40$	0.40	0,28	0,22	0,18	0,15	0,14
$0,40 \leq r_{4\alpha} \leq 0,55$	0.55	0,46	0,36	0,29	0,25	0,22
$0,55 \leq r_{4\alpha} \leq 0,70$	0.70	0,61	0,47	0,39	0,33	0,30
$0,70 \leq r_{4\alpha} \leq 0,85$	0.85	0,78	0,60	0,49	0,42	0,38
$0,85 \leq r_{5\alpha} \leq 1$	0.95	0,87	0,67	0,55	0,47	0,42
		0,95	0,73	0,60	0,52	0,46

Fuente: Elaboración propia.

La matriz obtenida muestra los indicadores de resiliencia con la vinculación de la amenaza volcánica, entrando con el indicador de amenaza volcánica y el indicador de resiliencia de la infraestructura hidráulica i. Tabla 38.

Dichos valores de resiliencia de la infraestructura i, estarán vinculados a la amenaza específica correspondiente, en este caso la amenaza volcánica.

La obtención de los valores propuestos se desarrolla posteriormente, siguiendo una evolución definida mediante funciones de distribución. Tabla 39.



3.4.3.2. Obtención de los valores, de los indicadores de resiliencia vinculados a la amenaza específica, según los rangos de amenaza y de resiliencia definidos.

3.4.3.2.1. Resiliencia hidrológica

Primeramente, se construyen y clasifican los rangos de amenaza y los rangos de amenaza específica, estableciendo una valoración inicial de los mismos en base a “un análisis experto” cuya distribución está definida por una función logarítmica del tipo $y = -0.198\ln(x) + 0.0613$ $R^2 = 1$.

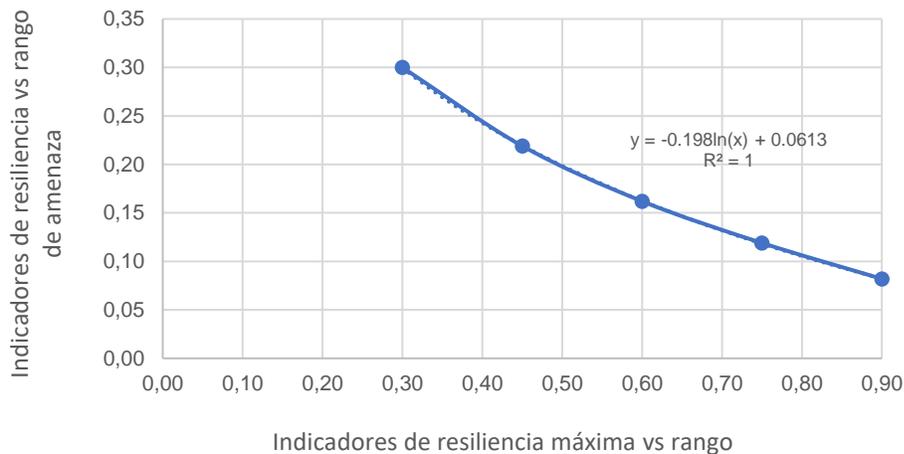


Figura 10 Resiliencia hidrológica. Función de evolución de Indicadores.

Fuente: Elaboración propia.

Fijados los valores iniciales de resiliencia específica (hidrológica) en el primer estadio de rangos cuya evolución es la indicada en la gráfica, se construye la evolución del resto de valores de rangos según una matriz cuya estructura de términos es la que se adjunta en el epígrafe siguiente.

Dicha matriz de transformación es de aplicación general a las amenazas específicas ya definidas inicialmente.

Proceso de construcción de valores de los indicadores de resiliencia vinculados a las amenazas específicas

- Matriz de transformación de indicadores de resiliencia según rangos de amenaza. Valores del indicador de resiliencia ($I_{am\acute{a}x}$) según rangos de amenaza hidráulica:

Los valores de del indicador de resiliencia (A_{01} , A_{02} , A_{03} , A_{04} , A_{05} , y A_{06}) se han fijado con valores máximos siguiendo una distribución según la función $y = -0.198\ln(x) + 0.0613$ $R^2 = 1$.

Rangos de amenaza hidráulica					
Amenaza	r1A	r2A	r3A	r4A	r5A
$l_{am\acute{a}x.}$	$A_{01} = 0.30$	$A_{02} = 0.22$	$A_{03} = 0.16$	$A_{04} = 0.12$	$A_{05} = 0.08$

Rangos de amenaza hidráulica					
	r1A	r2A	r3A	r4A	r5A
$l_{am\acute{i}n.}=0.15$	$\frac{A_{01}}{C_r=2.00} = A_{11}$	$\frac{A_{02}}{C_r=1.70} = A_{12}$	$\frac{A_{03}}{C_r=1.40} = A_{13}$	$\frac{A_{04}}{C_r=1.20} = A_{14}$	$\frac{A_{05}}{C_r=1.00} = A_{15}$
$l_{am\acute{a}x.}=0.25$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.60} = A_{21}$	$A_{21} \cdot (1 - A_{02}) = A_{22}$	$A_{22} \cdot (1 - A_{03}) = A_{23}$	$A_{23} \cdot (1 - A_{04}) = A_{24}$	$A_{24} \cdot (1 - A_{05}) = A_{25}$
$l_{am\acute{a}x.}=0.40$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.30} = A_{31}$	$A_{31} \cdot (1 - A_{02}) = A_{32}$	$A_{32} \cdot (1 - A_{03}) = A_{33}$	$A_{33} \cdot (1 - A_{04}) = A_{34}$	$A_{34} \cdot (1 - A_{05}) = A_{35}$
$l_{am\acute{a}x.}=0.55$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.22} = A_{41}$	$A_{41} \cdot (1 - A_{02}) = A_{42}$	$A_{42} \cdot (1 - A_{03}) = A_{43}$	$A_{43} \cdot (1 - A_{04}) = A_{44}$	$A_{44} \cdot (1 - A_{05}) = A_{45}$
$l_{am\acute{a}x.}=0.70$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.15} = A_{51}$	$A_{51} \cdot (1 - A_{02}) = A_{52}$	$A_{52} \cdot (1 - A_{03}) = A_{53}$	$A_{53} \cdot (1 - A_{04}) = A_{54}$	$A_{54} \cdot (1 - A_{05}) = A_{55}$
$l_{am\acute{a}x.}=0.85$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.10} = A_{61}$	$A_{61} \cdot (1 - A_{02}) = A_{62}$	$A_{62} \cdot (1 - A_{03}) = A_{63}$	$A_{63} \cdot (1 - A_{04}) = A_{64}$	$A_{64} \cdot (1 - A_{05}) = A_{65}$
$l_{am\acute{a}x.}=0.95$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.05} = A_{71}$	$A_{71} \cdot (1 - A_{02}) = A_{72}$	$A_{72} \cdot (1 - A_{03}) = A_{73}$	$A_{73} \cdot (1 - A_{04}) = A_{74}$	$A_{74} \cdot (1 - A_{05}) = A_{75}$

Rangos resiliencia hidráulica							
Amenaza		r1A	r2A	r3A	r4A	r5A	
r1A	$\frac{I_{akr=n=0.30}}{C_r=2.00} = A_{11}$	$\frac{I_{akr=n=0.45}}{C_r=1.60} = A_{21}$	$\frac{I_{akr=n=0.60}}{C_r=1.30} = A_{31}$	$\frac{I_{akr=n=0.75}}{C_r=1.22} = A_{41}$	$\frac{I_{akr=n=0.90}}{C_r=1.15} = A_{51}$	$\frac{I_{akr=n=0.96}}{C_r=1.10} = A_{61}$	$\frac{I_{akr=n=1.00}}{C_r=1.05} = A_{71}$

Finalmente, la matriz obtenida es del tipo:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} \\ A_{71} & A_{72} & A_{73} & A_{74} & A_{75} \end{bmatrix}$$

3.4.3.2.2. Resiliencia de remoción en masa

Se construyen y clasifican los rangos de amenaza y los rangos de amenaza específica, estableciendo una valoración inicial de los mismos en base a “un análisis experto” cuya distribución está definida por una función logarítmica del tipo $y = -0,284\ln(x) - 0,0402$ $R^2 = 0,9996$.

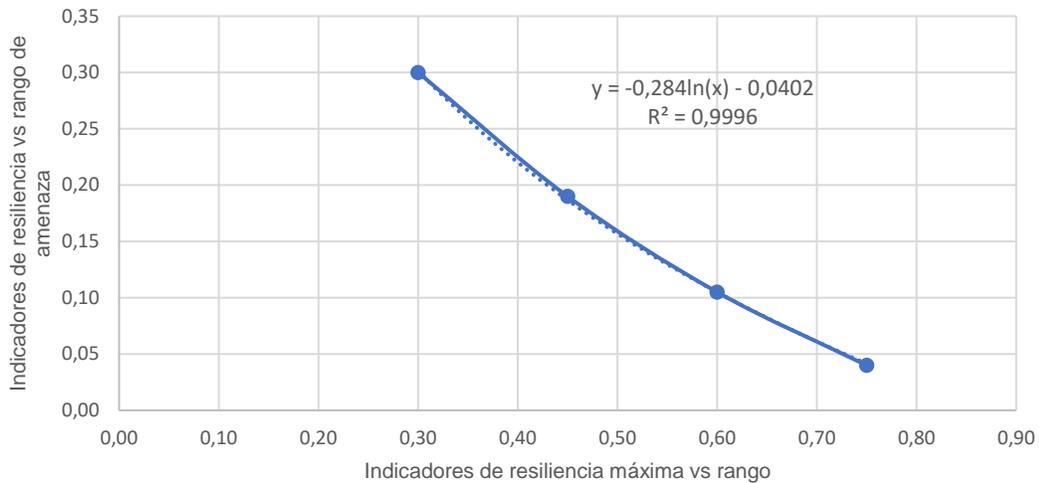


Figura 11 Resiliencia hidrológica. Función de evolución de Indicadores. Fuente: Elaboración propia.

Fijados los valores iniciales de resiliencia específica (remoción en masa) en el primer estadio de rangos cuya evolución es la indicada en la gráfica, se construye la evolución del resto de valores de rangos según una matriz cuya estructura de términos es la que se adjunta en el epígrafe siguiente.

Dicha matriz de transformación es de aplicación general a las amenazas específicas ya definidas inicialmente.

Proceso de construcción de valores de los indicadores de resiliencia vinculados a las amenazas específicas

- Matriz de transformación de indicadores de resiliencia según rangos de amenaza de remoción en masa.

Valores del indicador de resiliencia ($I_{am\acute{a}x.}$) según rangos de amenaza de remoción en masa:

Los valores de del indicador de resiliencia (A_{01} , A_{02} , A_{03} , A_{04} , y A_{05}) se han fijado con valores máximos siguiendo una distribución según la función $y = -0,284\ln(x) - 0,0402$ $R^2 = 0,9996$.

Tangos de amenaza de remoción en masa				
Amenaza	r1A	r2A	r3A	r4A
$I_{am\acute{a}x.}$	$A_{01} = 0.30$	$A_{02} = 0.19$	$A_{03} = 0.11$	$A_{04} = 0.04$

Rangos de amenaza de remoción en masa				
	r1A	r2A	r3A	r4A
$I_{am\acute{a}n.}=0.15$	$\frac{A_{01}}{C_r=2.00} = A_{11}$	$\frac{A_{02}}{C_r=1.70} = A_{12}$	$\frac{A_{03}}{C_r=1.40} = A_{13}$	$\frac{A_{04}}{C_r=1.20} = A_{14}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.25$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.60} = A_{21}$	$A_{21} \cdot (1 - A_{02}) = A_{22}$	$A_{22} \cdot (1 - A_{03}) = A_{23}$	$A_{23} \cdot (1 - A_{04}) = A_{24}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.40$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.30} = A_{31}$	$A_{31} \cdot (1 - A_{02}) = A_{32}$	$A_{32} \cdot (1 - A_{03}) = A_{33}$	$A_{33} \cdot (1 - A_{04}) = A_{34}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.55$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.22} = A_{41}$	$A_{41} \cdot (1 - A_{02}) = A_{42}$	$A_{42} \cdot (1 - A_{03}) = A_{43}$	$A_{43} \cdot (1 - A_{04}) = A_{44}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.70$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.15} = A_{51}$	$A_{51} \cdot (1 - A_{02}) = A_{52}$	$A_{52} \cdot (1 - A_{03}) = A_{53}$	$A_{53} \cdot (1 - A_{04}) = A_{54}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.85$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.10} = A_{61}$	$A_{61} \cdot (1 - A_{02}) = A_{62}$	$A_{62} \cdot (1 - A_{03}) = A_{63}$	$A_{63} \cdot (1 - A_{04}) = A_{64}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.95$	$\frac{A_{01}}{C_r=1.05} = A_{71}$	$A_{71} \cdot (1 - A_{02}) = A_{72}$	$A_{72} \cdot (1 - A_{03}) = A_{73}$	$A_{73} \cdot (1 - A_{04}) = A_{74}$

Rangos resiliencia de remoción en masa							
Amenaza		r1A	r2A	r3A	r4A	r5A	r6A
r1A	$\frac{I_{akr=n=0.30}}{C_r=2.00} = A_{11}$	$\frac{I_{akr=n=0.45}}{C_r=1.60} = A_{21}$	$\frac{I_{akr=n=0.60}}{C_r=1.30} = A_{31}$	$\frac{I_{akr=n=0.75}}{C_r=1.22} = A_{41}$	$\frac{I_{akr=n=0.90}}{C_r=1.15} = A_{51}$	$\frac{I_{akr=n=0.96}}{C_r=1.10} = A_{61}$	$\frac{I_{akr=n=1.00}}{C_r=1.05} = A_{71}$

Finalmente, la matriz obtenida es del tipo:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} \\ A_{71} & A_{72} & A_{73} & A_{74} \end{bmatrix}$$

3.4.3.2.3. Resiliencia sísmica

Primeramente, se construyen y clasifican los rangos de amenaza y los rangos de amenaza específica, estableciendo una valoración inicial de los mismos en base a “un análisis experto” cuya distribución está definida por una función logarítmica del tipo $y = -0,236\ln(x) + 0,0156$ $R^2 = 0,9999$.

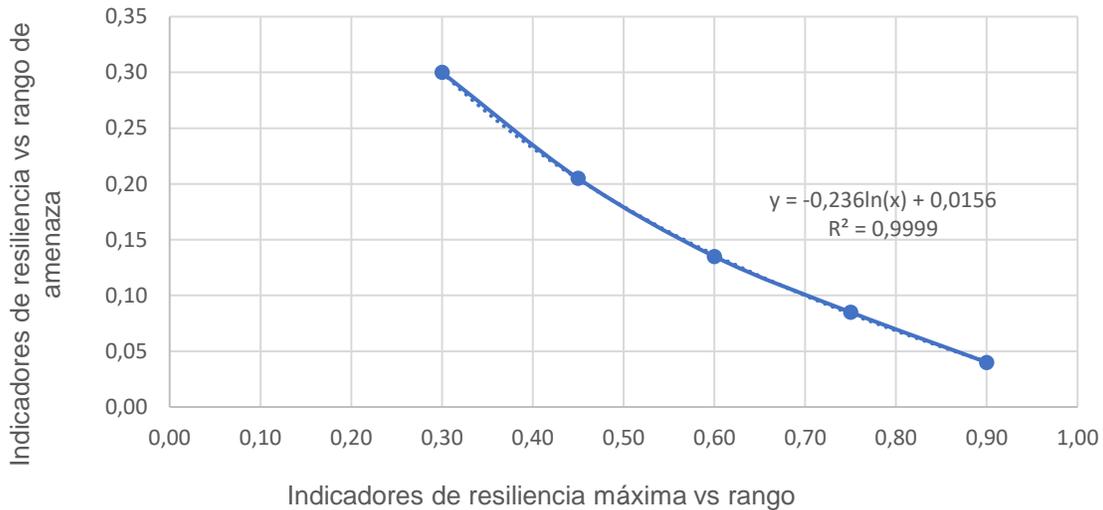


Figura 12 Resiliencia sísmica. Función de evolución de Indicadores. Fuente: Elaboración propia.

Fijados los valores iniciales de resiliencia específica (sísmica) en el primer estadio de rangos cuya evolución es la indicada en la gráfica, se construye la evolución del resto de valores de rangos según una matriz cuya estructura de términos es la que se adjunta en el epígrafe siguiente.

Dicha matriz de transformación es de aplicación general a las amenazas específicas ya definidas inicialmente.

Proceso de construcción de valores de los indicadores de resiliencia vinculados a las amenazas específicas

- Matriz de transformación de indicadores de resiliencia según rangos de amenaza.

Valores del indicador de resiliencia ($I_{am\acute{a}x}$) según rangos de amenaza sísmica:

Los valores del indicador de resiliencia (A_{01} , A_{02} , A_{03} , A_{04} , A_{05} , y A_{06}) se han fijado con valores máximos siguiendo una distribución según la función $y = -0,236\ln(x) + 0,0156$ $R^2 = 0,9999$.

Rangos de amenaza sísmica					
Amenaza	r1A	r2A	r3A	r4A	r5A
$I_{am\acute{a}x.}$	$A_{01} = 0.30$	$A_{02} = 0.21$	$A_{03} = 0.14$	$A_{04} = 0.09$	$A_{05} = 0.04$

Rangos de amenaza sísmica					
	r1A	r2A	r3A	r4A	r5A
$I_{am\acute{a}n.}=0.15$	$\frac{A_{01}}{C_{r=2.00}} = A_{11}$	$\frac{A_{02}}{C_{r=1.70}} = A_{12}$	$\frac{A_{03}}{C_{r=1.40}} = A_{13}$	$\frac{A_{04}}{C_{r=1.20}} = A_{14}$	$\frac{A_{05}}{C_{r=1.00}} = A_{15}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.25$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.60}} = A_{21}$	$A_{21} \cdot (1 - A_{02}) = A_{22}$	$A_{22} \cdot (1 - A_{03}) = A_{23}$	$A_{23} \cdot (1 - A_{04}) = A_{24}$	$A_{24} \cdot (1 - A_{05}) = A_{25}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.40$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.30}} = A_{31}$	$A_{31} \cdot (1 - A_{02}) = A_{32}$	$A_{32} \cdot (1 - A_{03}) = A_{33}$	$A_{33} \cdot (1 - A_{04}) = A_{34}$	$A_{34} \cdot (1 - A_{05}) = A_{35}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.55$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.22}} = A_{41}$	$A_{41} \cdot (1 - A_{02}) = A_{42}$	$A_{42} \cdot (1 - A_{03}) = A_{43}$	$A_{43} \cdot (1 - A_{04}) = A_{44}$	$A_{44} \cdot (1 - A_{05}) = A_{45}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.70$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.15}} = A_{51}$	$A_{51} \cdot (1 - A_{02}) = A_{52}$	$A_{52} \cdot (1 - A_{03}) = A_{53}$	$A_{53} \cdot (1 - A_{04}) = A_{54}$	$A_{54} \cdot (1 - A_{05}) = A_{55}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.85$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.10}} = A_{61}$	$A_{61} \cdot (1 - A_{02}) = A_{62}$	$A_{62} \cdot (1 - A_{03}) = A_{63}$	$A_{63} \cdot (1 - A_{04}) = A_{64}$	$A_{64} \cdot (1 - A_{05}) = A_{65}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.95$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.05}} = A_{71}$	$A_{71} \cdot (1 - A_{02}) = A_{72}$	$A_{72} \cdot (1 - A_{03}) = A_{73}$	$A_{73} \cdot (1 - A_{04}) = A_{74}$	$A_{74} \cdot (1 - A_{05}) = A_{75}$

Rangos resiliencia sísmica							
Amenaza	r1A	r2A	r3A	r4A	r5A	r6A	r7A
r1A	$\frac{I_{akr=n=0.30}}{C_{r=2.00}} = A_{11}$	$\frac{I_{akr=n=0.45}}{C_{r=1.60}} = A_{21}$	$\frac{I_{akr=n=0.60}}{C_{r=1.30}} = A_{31}$	$\frac{I_{akr=n=0.75}}{C_{r=1.22}} = A_{41}$	$\frac{I_{akr=n=0.90}}{C_{r=1.15}} = A_{51}$	$\frac{I_{akr=n=0.96}}{C_{r=1.10}} = A_{61}$	$\frac{I_{akr=n=1.00}}{C_{r=1.05}} = A_{71}$

Finalmente, la matriz obtenida es del tipo:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} \\ A_{71} & A_{72} & A_{73} & A_{74} & A_{75} \end{bmatrix}$$

3.4.3.2.4. Resiliencia volcánica

Primeramente, se construyen y clasifican los rangos de amenaza y los rangos de amenaza específica, estableciendo una valoración inicial de los mismos en base a “un análisis experto” cuya distribución está definida por una función logarítmica del tipo $y = -0,174\ln(x) + 0,0905$ $R^2 = 1$.

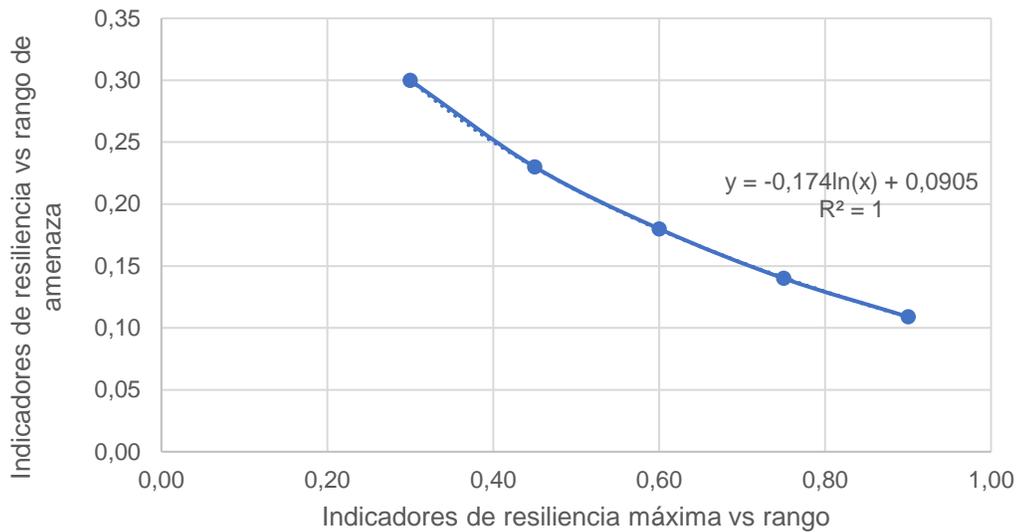


Figura 13 Resiliencia sísmica. Función de evolución de Indicadores. Fuente: Elaboración propia.

Fijados los valores iniciales de resiliencia específica (volcánica) en el primer estadio de rangos cuya evolución es la indicada en la gráfica, se construye la evolución del resto de valores de rangos según una matriz cuya estructura de términos es la que se adjunta en el epígrafe siguiente.

Dicha matriz de transformación es de aplicación general a las amenazas específicas ya definidas inicialmente.

Proceso de construcción de valores de los indicadores de resiliencia vinculados a las amenazas específicas

- Matriz de transformación de indicadores de resiliencia según rangos de amenaza.

Valores del indicador de resiliencia ($I_{\text{máx.}}$) según rangos de amenaza volcánica:

Los valores de del indicador de resiliencia (A_{01} , A_{02} , A_{03} , A_{04} , A_{05} , y A_{06}) se han fijado con valores máximos siguiendo una distribución según la función $y = -0,174\ln(x) + 0,0905$ $R^2 = 1$.

Rangos de amenaza volcánica					
Amenaza	r1A	r2A	r3A	r4A	r5A
$I_{am\acute{a}x.}$	$A_{01} = 0.30$	$A_{02} = 0.23$	$A_{03} = 0.18$	$A_{04} = 0.14$	$A_{05} = 0.11$

Rangos de amenaza volcánica					
	r1A	r2A	r3A	r4A	r5A
$I_{am\acute{a}n.}=0.15$	$\frac{A_{01}}{C_{r=2.00}} = A_{11}$	$\frac{A_{02}}{C_{r=1.70}} = A_{12}$	$\frac{A_{03}}{C_{r=1.40}} = A_{13}$	$\frac{A_{04}}{C_{r=1.20}} = A_{14}$	$\frac{A_{05}}{C_{r=1.00}} = A_{15}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.25$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.60}} = A_{21}$	$A_{21} \cdot (1 - A_{02}) = A_{22}$	$A_{22} \cdot (1 - A_{03}) = A_{23}$	$A_{23} \cdot (1 - A_{04}) = A_{24}$	$A_{24} \cdot (1 - A_{05}) = A_{25}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.40$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.30}} = A_{31}$	$A_{31} \cdot (1 - A_{02}) = A_{32}$	$A_{32} \cdot (1 - A_{03}) = A_{33}$	$A_{33} \cdot (1 - A_{04}) = A_{34}$	$A_{34} \cdot (1 - A_{05}) = A_{35}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.55$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.22}} = A_{41}$	$A_{41} \cdot (1 - A_{02}) = A_{42}$	$A_{42} \cdot (1 - A_{03}) = A_{43}$	$A_{43} \cdot (1 - A_{04}) = A_{44}$	$A_{44} \cdot (1 - A_{05}) = A_{45}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.70$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.15}} = A_{51}$	$A_{51} \cdot (1 - A_{02}) = A_{52}$	$A_{52} \cdot (1 - A_{03}) = A_{53}$	$A_{53} \cdot (1 - A_{04}) = A_{54}$	$A_{54} \cdot (1 - A_{05}) = A_{55}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.85$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.10}} = A_{61}$	$A_{61} \cdot (1 - A_{02}) = A_{62}$	$A_{62} \cdot (1 - A_{03}) = A_{63}$	$A_{63} \cdot (1 - A_{04}) = A_{64}$	$A_{64} \cdot (1 - A_{05}) = A_{65}$
$I_{am\acute{a}x.}=0.95$	$\frac{A_{01}}{C_{r=1.05}} = A_{71}$	$A_{71} \cdot (1 - A_{02}) = A_{72}$	$A_{72} \cdot (1 - A_{03}) = A_{73}$	$A_{73} \cdot (1 - A_{04}) = A_{74}$	$A_{74} \cdot (1 - A_{05}) = A_{75}$

Rangos resiliencia volcánica							
Amenaza	r1A	r2A	r3A	r4A	r5A	r6A	r7A
r1A	$\frac{I_{akr=n=0.30}}{C_{r=2.00}} = A_{11}$	$\frac{I_{akr=n=0.45}}{C_{r=1.60}} = A_{21}$	$\frac{I_{akr=n=0.60}}{C_{r=1.30}} = A_{31}$	$\frac{I_{akr=n=0.75}}{C_{r=1.22}} = A_{41}$	$\frac{I_{akr=n=0.90}}{C_{r=1.15}} = A_{51}$	$\frac{I_{akr=n=0.96}}{C_{r=1.10}} = A_{61}$	$\frac{I_{akr=n=1.00}}{C_{r=1.05}} = A_{71}$

Finalmente, la matriz obtenida es del tipo:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} \\ A_{71} & A_{72} & A_{73} & A_{74} & A_{75} \end{bmatrix}$$

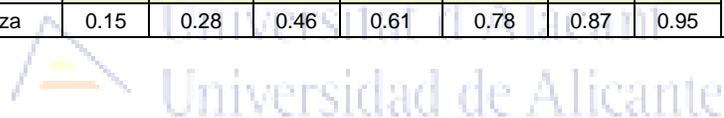
- Inicialmente, Obtención de los coeficientes Crk, según rango de amenaza y rango de resiliencia.

Susceptibilidad (f+O) S≤0.50		Valores máximos por rango de amenaza específica					Función de distribución
Crk máx. Eje Abscisas		2.00	1.70	1.40	1.20	1.00	y = -0.4573x ² + 0.5057x + 0.9496 R ² = 1
I _{omáx.} Vs rango amenaza		0.15	0.13	0.12	0.10	0.08	

		Valores máximos por rango de amenaza específica						Función de distribución	
Crk máx. Eje Ordenadas		2.00	1.60	1.30	1.22	1.15	1.10	1.05	y = 1.1086x - 2.923 R ² = 0.9935
I _{omáx.} Vs rango amenaza		0.15	0.25	0.4	0.55	0.7	0.85	0.95	

Susceptibilidad (f+O) S>0.50		Valores mínimos por rango de amenaza específica					Función de distribución
Crk mín. Eje abscisas		0.60	0.37	0.23	0.14	0.08	y = 1.1086x ^{-1.923} R ² = 0.985
I _{omáx.} Vs rango amenaza		0.30	0.22	0.16	0.12	0.08	

		Valores mínimos por rango de amenaza específica						Función de distribución	
Crk mín. Eje Ordenadas		0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	0.96	1.00	y = 0.9447x ^{1.5124} R ² = 0.9983
I _{omáx.} Vs rango amenaza		0.15	0.28	0.46	0.61	0.78	0.87	0.95	



Desarrollada, la metodología de cálculo de los indicadores de resiliencia y de amenaza específica, vinculados y establecidos los valores máximos y mínimos de los mismos en base al desarrollo de Sistema de Infraestructuras hidráulicas (Susceptibilidad total), se procede seguidamente a la propuesta, definición y caracterización de los indicadores de resiliencia de la infraestructura hidráulica ante amenazas tanto hidrológicas como geológicas.

3.4.3.2.5. Resumen de resiliencias específicas de amenaza

3.4.3.2.5.1. Resiliencia hidrológica

En la ecuación (22) se presenta la resiliencia hidrológica de la infraestructura i (α_{Hi}), calculada como la suma ponderada ($W\alpha_{Hi}$) de los indicadores de resiliencia hidrológica de la infraestructura i ($I\alpha_{Hi}$). Estos medirían la capacidad de respuesta de la infraestructura i frente a una amenaza hidrológica.

$$\alpha_{Hi}[Uc_H \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{Hi}} W\alpha_{Hi} \cdot I\alpha_{Hi} [Uc_H \cdot Daño^{-1}] \quad (22)$$

3.4.3.2.5.2. Resiliencia geológica

3.4.3.2.5.2.1. Resiliencia de remoción en masa

En la ecuación (23) se presenta la resiliencia de remoción en masa de la infraestructura i (α_{RMI}), calculada como la suma ponderada ($W\alpha_{RMI}$) de los indicadores de resiliencia de remoción en masa de la infraestructura i ($I\alpha_{RMI}$). Estos medirían la capacidad de respuesta de la infraestructura i frente a una amenaza de remoción en masa.

$$\alpha_{RMI}[Uc_{RM} \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{Hi}} W\alpha_{RMI} \cdot I\alpha_{RMI} [Uc_{RM} \cdot Daño^{-1}] \quad (23)$$

3.4.3.2.5.2.2. Resiliencia sísmica

En la ecuación (24) se presenta la resiliencia sísmica de la infraestructura i (α_{SMi}), calculada como la suma ponderada ($W\alpha_{SMi}$) de los indicadores de resiliencia sísmica de la infraestructura i ($I\alpha_{SMi}$). Estos medirían la capacidad de respuesta de la infraestructura i frente a una amenaza sísmica.

$$\alpha_{SMi}[Uc_{SM} \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{Hi}} W\alpha_{SMi} \cdot I\alpha_{SMi} [Uc_{SM} \cdot Daño^{-1}] \quad (24)$$

3.4.3.2.5.2.3. Resiliencia volcánica

En la ecuación (25) se presenta la resiliencia volcánica de la infraestructura i (α_{vi}), calculada como la suma ponderada ($W\alpha_{vil}$) de los indicadores de resiliencia volcánica de la infraestructura i ($I\alpha_{vil}$). Estos medirían la capacidad de respuesta la infraestructura i frente a una amenaza volcánica.

$$\alpha_{vi}[Uc_v \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{Hi}} W\alpha_{vil} \cdot I\alpha_{vil} [Uc_v \cdot Daño^{-1}] \quad (25)$$

En el anexo 8 se adjunta la caracterización de los Indicadores de resiliencia específica de los componentes de la Infraestructura hidráulica, del Sistema de Abastecimiento y del Sistema de Saneamiento.



3.5. Indicadores de Vulnerabilidad

Los indicadores de vulnerabilidad se obtienen a partir de los correspondientes indicadores de susceptibilidad (I_s) y de resiliencia (I_r), que en base a las investigaciones de Cardona O.D., (2001), y de FEMA-HAZUS, (2004), desarrolla la matriz de vulnerabilidad representada en la Tabla 7, además de las curvas de probabilidad de daño (distribución log-normal) representadas en la Figura 14.

Tabla 40 Indicador de vulnerabilidad según probabilidad y estado de daño.

Fuente: HAZUS-FEMMA (2004). Adaptada.

Probabilidad daño	Indicador de Vulnerabilidad (Iv)			
	Menor	Moderado	Extensivo	Completo
0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,0500	0,01	0,00	0,00	0,00
0,1000	0,01	0,00	0,00	0,00
0,1500	0,02	0,00	0,00	0,00
0,2000	0,03	0,03	0,00	0,00
0,2500	0,03	0,04	0,00	0,00
0,3000	0,05	0,05	0,00	0,00
0,3500	0,06	0,07	0,00	0,00
0,4000	0,07	0,08	0,00	0,00
0,4500	0,08	0,10	0,10	0,00
0,5000	0,10	0,12	0,12	0,00
0,5500	0,10	0,15	0,15	0,00
0,6000	0,12	0,19	0,19	0,00
0,6500	0,14	0,23	0,23	0,00
0,7000	0,18	0,30	0,30	0,30
0,7500	0,21	0,40	0,40	0,40
0,8000	0,27	0,57	0,57	0,57
0,8500	0,34	0,90	0,90	0,90
0,9000	0,45	1,90	1,90	1,90
0,9500	0,63	10,00	10,00	10,00
1,0000	1,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se adjunta la Figura 14 que representa los estadios de daño con relación al indicador de vulnerabilidad.

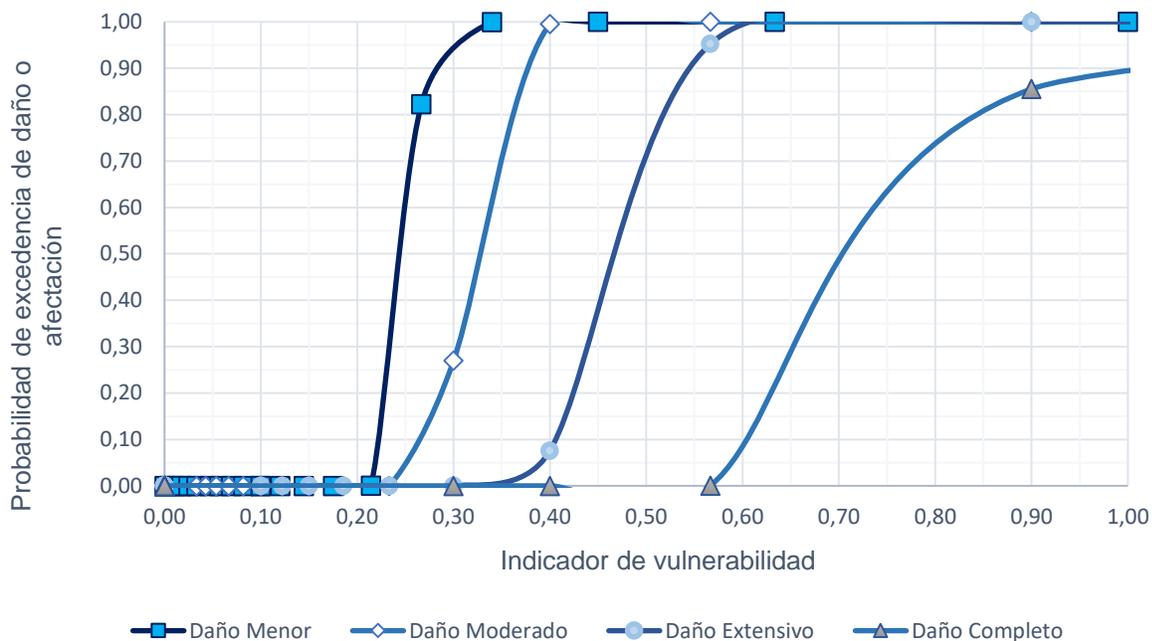


Figura 14 Funciones de vulnerabilidad y probabilidad de daño.

Fuente: Elaboración propia.

Dichas funciones de vulnerabilidad se han obtenido a partir de la metodología Hazus-FEMA, y cuyos parámetros críticos según la probabilidad o grado de daño, son los que se adjuntan.

Tabla 41 Nivel de daño y parámetros estadísticos.

Daño	Media μ .	Desviación típica σ .
Menor	0,19	0,24
Moderado	0,23	0,24
Extensivo	0,33	0,25
Completo	0,54	0,23

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Indicadores de Sostenibilidad

Los indicadores Generales y de Sostenibilidad propuestos en la investigación se han estructurado en base a los postulados de Rouse M., (2014); Tortajada C., (2010) y basándose en análisis empíricos obtenidos en diversos abastecimientos en España y otros países, clasificándolos a continuación:

INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD
ECONÓMICOS
AMBIENTALES
SOCIALES
DE ESTRATEGIA O DE GESTIÓN:
GRADO DE DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
GRADO DE IMPLANTACIÓN DE LA RESILIENCIA

ECONÓMICOS
Abastecimiento
Nº fallas red de distribución/km año
Nº fallas acometidas domiciliarias abastecimiento de agua potable. /km año
Nº fallas totales abastecimiento/Nº abonados
Volumen agua no registrada (m3/km día)
Alcantarillado
Nº fallas totales saneamiento/Nº clientes
Nº fallas red de alcantarillado año/Longitud red (km)
Nº fallas acometidas domiciliarias o arranques alcantarillado año/Longitud red (km)

AMBIENTALES
INDICADORES GLOBALES de eficiencia energética [KWh/m3]
Generales de Energía
Energía eléctrica consumida en toda la empresa por unidad de agua producida [KWh/m3.prod]
Energía eléctrica consumida en toda la empresa por unidad de agua facturada [KWh/m3.fact]
Producción de energía verde o Auto sustentabilidad energética [Total MWh generados / MWh consumidos]
Cogeneración Eléctrica [MWh/mes]
Cogeneración Térmica [MWh/mes]
Hidráulica (MWh/mes/m3 agua tratada)
Solar (MWh/mes/m3 agua tratada)
Eólica (MWh/mes/m3 agua tratada)
Cogeneración [MWh.eléctricos Cogenerados/mes/Total MWh.eléctricos consumidos]
Cogeneración [MWh. Térmicos Cogenerados/mes/Total MWh. Térmicos consumidos]
Hidráulica [MWh Hidráulicos/mes/Total MWh consumidos]
Solar [MWh Solar/mes/Total MWh consumidos]
Eólica (MWh/mes/m3 agua tratada)

Generales Operativos
KWh consumidos en el Sistema (excluidos los edificios administrativos)
A- KWh agua producida/M3 agua producida
B- KWh/M3 agua depurada
KWh consumidos en el Sistema (excluidos los edificios administrativos) /A+B
Abastecimiento
<i>Consumo energético PRODUCCIÓN [KWh/m3]</i>
KWh consumidos/m3 de agua potable superficial producida
<i>Consumo energético CAPTACIONES SUBTERRÁNEAS [KWh/m3]</i>
KWh consumidos/m3 agua extraída y producida de fuentes subterráneas
<i>Consumo energético ELEVACIÓN AGUA POTABLE [KWh/m3]</i>
KWh consumido/m3 de agua potable elevada
Huella de Carbono (anual)
Emisiones de CO2 (Ton)/m3 agua suministrada
Emisiones de CO2 (Ton)/m3 agua facturada
Alcantarillado
<i>Consumo energético ELEVACIÓN AGUAS SERVIDAS</i>
KWh/m3 de Aguas Servidas elevada
Emisiones de CO2 (Ton)/año
Depuración (AS)
KWh consumidos/ m3 de agua servida tratada
Emisiones de CO2 (Ton)/m3 agua servida tratada
Otros servicios auxiliares
Consumo energético RECINTOS NO PRODUCTIVOS (KWh/mes)
KWh consumidos en recintos no productivos de la RM
Huella Hídrica (anual)
m3 agua consumida en operación e infraestructura año/m3 agua suministrada año

Específicos
Abastecimiento
Nº ensayos calidad agua año/Longitud red distribución (km)
Alcantarillado
Nº de obstrucciones red de saneamiento año/Longitud red de saneamiento (km)
Nº de alivios/año
Depuración
m3 agua regenerada/hab. (año)
m3 agua regenerada/m3 agua depurada (año)
m3 agua reutilizad/m3 agua depurada (año)
m3 agua reutilizada en industria/m3 agua total consumida en la industria (año)
m3 agua reutilizada en agricultura/m3 agua total consumida en la agricultura (año)
m3 agua reutilizada en usos medioambientales/m3 agua total consumida en usos medioambientales (año)
Longitud de red agua regenerada (km)/Longitud total red de abastecimiento-distribución (km/año)
Biosólidos
[Ton. dispuestas en predios agrícolas / Ton totales]
[Ton. dispuestas en CGIB (*) El Rotal / Ton totales]
[Ton. valorizadas energéticamente / Ton totales]
[Ton dispuestas en relleno sanitario / Ton totales]
(*) Centro Gestión Integral de Biosólidos
Drenaje
Nº Incidencias o avisos
Tanques Anti-DSU (m3)
Capacidad de drenaje (m3) /Longitud red saneamiento (km)
Máx. Intensidad de lluvia anual(l/m2) / (Volumen laminación (m3) /superficie total cuencas (m2)

SOCIALES
INUNDACIÓN (EPISODIOS DE LLUVIAS INTENSAS)
Abastecimiento
Nº Incidencias o avisos en redes de transporte o matrices
Nº Incidencias o avisos en redes de distribución
Nº Incidencias o avisos en estaciones de Bombeo (PEAP)
Nº Incidencias o avisos en estanques
Nº Incidencias o avisos en estación Tratamiento de Agua Potable (PTAP)
Nº Incidencias o avisos en Captaciones superficiales y subterráneas
Nº Incidencias o avisos en Infraestructuras auxiliares
Nº de horas interrupción suministro de agua potable (calidad del agua) /Nº habitantes afectados
Alcantarillado
Nº Incidencias en Red General Colectores
Nº Incidencias en Redes primarias y secundarias
Nº Incidencias en Plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS)
Nº Incidencias en Plantas de Tratamiento de aguas Residuales (PTAS)
Nº Incidencias en por Insuficiencia elementos de captación (imbornales)
Nº Incidencias en Tanques de Retención, Laminación
REMOCIONES EN MASA (ALUVIONES)
Abastecimiento
Nº Incidencias en Redes de transporte o matrices
Nº Incidencias en Redes de distribución
Nº Incidencias en Estaciones de Bombeo o Planta Elevadora A.P. (PEAP)
Nº Incidencias en Depósitos
Nº Incidencias en Estación Tratamiento de Agua Potable (PTAP)
Nº Incidencias en Captaciones
Nº Incidencias en Infraestructuras auxiliares
Nº de horas interrupción suministro (calidad del agua) /Nº habitantes afectados
Alcantarillado
Nº Incidencias en Red General Colectores
Nº Incidencias en Redes primarias y secundarias
Nº Incidencias en Estaciones de Bombeo (PEAR)
Nº Incidencias en Estación Depuradora de aguas Residuales (PTAS)
Nº Incidencias en Insuficientes elementos de captación (imbornales)
Nº Incidencias en Tanques de Retención, Laminación
SISMOS
Abastecimiento
Nº Incidencias en Redes de transporte o matrices
Nº Incidencias en Redes de distribución
Nº Incidencias en Estaciones de Bombeo o Planta Elevadora A.P. (PEAP)
Nº Incidencias en Depósitos
Nº Incidencias en Estación Tratamiento de Agua Potable (ETAP)
Nº Incidencias en Captaciones
Nº Incidencias en Infraestructuras auxiliares
Nº de horas interrupción suministro (calidad del agua) /Nº habitantes afectados
Alcantarillado
Nº de Incidencias Red General Colectores
Nº de Incidencias Redes primarias y secundarias

Nº de Incidencias Estaciones de Bombeo (EBAR)
Nº de Incidencias Insuficientes elementos de captación
Nº de Incidencias Tanques de Retención, Laminación

GESTIÓN DE LA DISCONTINUIDAD DEL SERVICIO Y ATENCIÓN CIUDADANA

Generales

Nº de incidencias en la continuidad del servicio y tipología de medios de aviso de estas:
Redes Sociales. (%)
Celular (%)
Prensa (%)
Radio (%)
Televisión (%)
Incidencias de las fallas en la red de agua potable y/o alcantarillado como factor de riesgo sanitario a la población. (%)
Grado de desarrollo de Políticas de divulgación y conocimiento al ciudadano relacionadas con la Infraestructura hidráulica. (%)
Acciones de atención al ciudadano en relación con incidencias en la Infraestructura hidráulica. (%)

Abastecimiento

Evolución anual del Nº de Cortes red de abastecimiento (%)
Evolución de la duración de los cortes de suministro (horas) (%)
Evolución anual del Nº Clientes afectados por corte del suministro (%)
Evolución anual del Nº arranques de abastecimiento afectados (%)
Nº de válvulas red de distribuciones operadas por corte del suministro (%)
Evolución del volumen de agua perdida por corte (m3) (%)
Longitud red afectada (km)/Longitud total red (km) (%)

GRADO DE IMPLANTACIÓN DE LA RESILIENCIA

1.- Monitorización de la Infraestructura hidráulica
2.- Seguridad activa de las instalaciones
3.- Seguridad procesos de gestión hidráulica
4.- Equipos de especialistas con formación avanzada.
5.- Implantación de dispositivos de alerta, control y regulación de procesos
6.- Sistemas avanzados de ayuda a la toma de decisiones en tiempo real
7.- Implantación de la gestión integral del Sistema.
8.- Diseños avanzados y nuevos materiales

ESTRATEGIA O DE GESTIÓN
GRADO DE DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
Norma ISO 14000 SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL- (0-100%)
Acueductos (%)
Red Transporte (%)
Red distribución (%)
PTAP (%)
Pozos (%)
Alcantarillado (Red) (%)
PTAS (%)
PEAS (%)
Norma ISO 50001 SISTEMAS DE GESTIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA- (0-100%)
Acueductos (%)
Red Transporte (%)
Red distribución (%)
PTAP (%)
Pozos (%)
Alcantarillado (Red) (%)
PTAS (%)
PEAS (%)
Norma ISO 22000 SISTEMAS DE GESTIÓN DE SEGURIDAD ALIMENTARIA- (0-100%)
Acueductos (%)
Red Transporte (%)
Red distribución (%)
PTAP (%)
Pozos (%)
Red saneamiento (%)
PTAS (%)
PEAS (%)
Norma ISO 55001 SISTEMAS DE GESTIÓN DE ACTIVOS- (0-100%)
Acueductos (%)
Red Transporte (%)
Red distribución (%)
PTAP (%)
Pozos (%)
Red saneamiento (%)
PTAS (%)
PEAS (%)
Red de alcantarillado (%)



3.7. Riesgos

El riesgo se define como la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas a causa de un desastre, resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones vulnerables a las cuales está expuesto el elemento DELNET-ONU,(2009). Otra definición es la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Los factores que lo componen son la amenaza y la vulnerabilidad CIIFEN, (2018). En este estudio se define la amenaza como el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad UNDR0, (1979).

A continuación, se adjuntan los riesgos hidrológicos y geológicos (remoción en masa, sísmico, y volcánico, que se han caracterizado y analizado sus efectos potenciales sobre los componentes de la Infraestructura hidráulica (abastecimiento y saneamiento).

3.7.1. Riesgo Hidrológico

3.7.1.1. Riesgo hidrológico del Sistema de Abastecimiento

Tabla 42 Riesgo hidrológico Sistema de Abastecimiento.

Tipología infraestructura	Amenaza hidrológica (A_H)*($\sum F_{PH}$)	Susceptibilidad (S)	Resiliencia hidrológica (α_H) [U_{CH} *Daño ⁻¹]	Vulnerabilidad hidrológica [U_{CH} *Daño ⁻¹]	Riesgo hidrológico (R_{KH}) [Daño]	Factor de riesgo hidrológico unitario (FR_{KH}). [Daño/ U_{CH}]
Acueductos (AC)	A_H	$I_{S f_{AC+oAC}}$	$I\alpha_{H AC}$	$V_{AC H}$	$R_{AC H}$	$FR_{AC H}$
Captaciones Superficiales (CS)	A_H	$I_{S f_{CS+oCS}}$	$I\alpha_{H CS}$	$V_{CS H}$	$R_{CS H}$	$FR_{CS H}$
Embalses (EMB)	A_H	$I_{S f_{EMB+oEMB}}$	$I\alpha_{H EMB}$	$V_{EMB H}$	$R_{EMB H}$	$FR_{EMB H}$
Estanques (EST)	A_H	$I_{S f_{EST+oEST}}$	$I\alpha_{H EST}$	$V_{EST H}$	$R_{EST H}$	$FR_{EST H}$
Plantes Elevadores de agua potable (PEAP)	A_H	$I_{S f_{PEAP+oPEAP}}$	$I\alpha_{H PEAP}$	$V_{PEAP H}$	$R_{PEAP H}$	$FR_{PEAP H}$
Plantas Tratamiento de agua potable (PTAP)	A_H	$I_{S f_{PTAP+oPTAP}}$	$I\alpha_{H PTAP}$	$V_{PTAP H}$	$R_{PTAP H}$	$FR_{PTAP H}$
Pozos de captación (PC)	A_H	$I_{S f_{PC+oPC}}$	$I\alpha_{H PC}$	$V_{PC H}$	$R_{PC H}$	$FR_{PC H}$
Red de Distribución (RD)	A_H	$I_{S f_{RD+oRD}}$	$I\alpha_{H RD}$	$V_{RD H}$	$R_{RD H}$	$FR_{RD H}$
Red de Transporte (RT)	A_H	$I_{S f_{RT+oRT}}$	$I\alpha_{H RT}$	$V_{RT H}$	$R_{RT H}$	$FR_{RT H}$

Fuente: Elaboración propia.

3.7.1.2. Riesgo hidrológico del Sistema de Saneamiento

Tabla 43 Riesgo hidrológico. Sistema de Saneamiento.

Tipología infraestructura	Amenaza hidrológica (A_H)*(ΣF_{PH})	Susceptibilidad (S_i)	Resiliencia hidrológica (α_H) [U_{CH} *Daño ⁻¹]	Vulnerabilidad hidrológica [U_{CH} *Daño ⁻¹]	Riesgo hidrológico (R_{KH}) [Daño]	Factor de riesgo hidrológico unitario (FR_{KH}). [Daño/ U_{CH}]
Plantas Elevadoras de aguas servidas (PEAS)	A_H	$I_S f_{PEAS+oPEAS}$	$I\alpha_H PEAS$	$V_{PEAS H}$	$R_{PEAS H}$	$FR_{PEAS H}$
Plantas Tratamiento de aguas servidas (PTAS)	A_H	$I_S f_{PTAS+oPTAS}$	$I\alpha_H PTAS$	$V_{PTAS H}$	$R_{PTAS H}$	$FR_{PTAS H}$
Red de Alcantarillado (RAS)	A_H	$I_S f_{RAS+oRAS}$	$I\alpha_H RAS$	$V_{RAS H}$	$R_{RAS H}$	$FR_{RAS H}$

Fuente: Elaboración propia



3.7.2. Riesgo Geológico

3.7.2.1. Riesgo de Remoción en masa

3.7.2.1.1. Riesgo de Remoción en masa del Sistema de Abastecimiento

Tabla 44 Riesgo de remoción en masa Sistema de Abastecimiento.

Tipología infraestructura	Amenaza remoción en masa (A_{RM})*($\sum F_{PRM}$)	Susceptibilidad (Si)	Resiliencia remoción en masa (α_{RM}) [U_{CRM} *Daño ⁻¹]	Vulnerabilidad remoción en masa [U_{CRM} *Daño-1]	Riesgo remoción en masa (R_{ikRM}) [Daño]	Factor de riesgo de Remoción en masa unitario (FR_{kRM}). [Daño]
Acueductos (AC)	A_{RM}	$I_{S fAC+oAC}$	$I\alpha_{RM AC}$	$V_{AC RM}$	$R_{AC RM}$	$FR_{AC RM}$
Captaciones Superficiales (CS)	A_{RM}	$I_{S fCS+oCS}$	$I\alpha_{RM CS}$	$V_{CS RM}$	$R_{CS RM}$	$FR_{CS RM}$
Embalses (EMB)	A_{RM}	$I_{S fEMB+oEMB}$	$I\alpha_{RM EMB}$	$V_{EMB RM}$	$R_{EMB RM}$	$FR_{EMB RM}$
Estanques (EST)	A_{RM}	$I_{S fEST+oEST}$	$I\alpha_{RM EST}$	$V_{EST RM}$	$R_{EST RM}$	$FR_{EST RM}$
Plantes Elevadores de agua potable (PEAP)	A_{RM}	$I_{S fPEAP+oPEAP}$	$I\alpha_{RM PEAP}$	$V_{PEAP RM}$	$R_{PEAP RM}$	$FR_{PEAP RM}$
Plantas Tratamiento de agua potable (PTAP)	A_{RM}	$I_{S fPTAP+oPTAP}$	$I\alpha_{RM PTAP}$	$V_{PTAP RM}$	$R_{PTAP RM}$	$FR_{PTAP RM}$
Pozos de captación (PC)	A_{RM}	$I_{S fPC+oPC}$	$I\alpha_{RM PC}$	$V_{PC RM}$	$R_{PC RM}$	$FR_{PC RM}$
Red de Distribución (RD)	A_{RM}	$I_{S fRD+oRD}$	$I\alpha_{RM RD}$	$V_{PEAS RM}$	$R_{PEAS RM}$	$FR_{PEAS RM}$
Red de Transporte (RT)	A_{RM}	$I_{S fRT+oRT}$	$I\alpha_{RM RT}$	$V_{RT RM}$	$R_{RT RM}$	$FR_{RT RM}$

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.1.2. Riesgo de Remoción en masa del Sistema de Saneamiento

Tabla 45 Riesgo de remoción en masa Sistema de Saneamiento

Tipología infraestructura	Amenaza remoción en masa (A_{RM})*(ΣF_{PRM})	Indicador Susceptibilidad (St)	Indicador de resiliencia remoción en masa (α_{RM}) [U_{CRM} *Daño ⁻¹]	Indicador de vulnerabilidad remoción en masa [U_{CRM} *Daño-1]	Riesgo remoción en masa (R_{ikRM}) [Daño]	Factor de riesgo de Remoción en masa unitario (FR_{kRM}). [Daño]
Plantas Elevadoras de aguas servidas (PEAS)	A_{RM}	$I_{S f_{PEAS+oPEAS}}$	$I\alpha_{RM PEAS}$	$V_{PEAS RM}$	$R_{PEAS RM}$	$FR_{PEAS RM}$
Plantas Tratamiento de aguas servidas (PTAS)	A_{RM}	$I_{S f_{PTAS+oPTAS}}$	$I\alpha_{RM PTAS}$	$V_{PTAS RM}$	$R_{PTAS RM}$	$FR_{PTAS RM}$
Red de Alcantarillado (RAS)	A_{RM}	$I_{S f_{RAS+oRAS}}$	$I\alpha_{RM RAS}$	$V_{RAS RM}$	$R_{RAS RM}$	$FR_{RAS RM}$

Fuente: Elaboración propia.



3.7.2.2. Riesgo Sísmico

3.7.2.2.1. Riesgo Sísmico del Sistema de Abastecimiento

Tabla 46 Riesgo sísmico Sistema de Abastecimiento.

Tipología infraestructura	Amenaza sísmica (A_{SM}) *($\sum F_{pSM}$)	Susceptibilidad (Si)	Resiliencia sísmico (α_{SM}) [U_{CSM} *Daño ⁻¹]	Vulnerabilidad Sísmica [U_{CSM} *Daño-1]	Riesgo sísmico (R_{kSM}) [Daño]	Factor riesgo sísmico unitario (FR_{kSM}). [Daño]
Acueductos (AC)	A_{SM}	$I_{S fAC+oAC}$	$I\alpha_{SM AC}$	$V_{AC SM}$	$R_{AC SM}$	$FR_{AC SM}$
Captaciones Superficiales (CS)	A_{SM}	$I_{S fCS+oCS}$	$I\alpha_{SM CS}$	$V_{CS SM}$	$R_{CS SM}$	$FR_{CS SM}$
Embalses (EMB)	A_{SM}	$I_{S fEMB+oEMB}$	$I\alpha_{SM EMB}$	$V_{EMB SM}$	$R_{EMB SM}$	$FR_{EMB SM}$
Estanques (EST)	A_{SM}	$I_{S fEST+oEST}$	$I\alpha_{SM EST}$	$V_{EST SM}$	$R_{EST SM}$	$FR_{EST SM}$
Plantes Elevadores de agua potable (PEAP)	A_{SM}	$I_{S fPEAP+oPEAP}$	$I\alpha_{SM PEAP}$	$V_{PEAP SM}$	$R_{PEAP SM}$	$FR_{PEAP SM}$
Plantas Tratamiento de agua potable (PTAP)	A_{SM}	$I_{S fPTAP+oPTAP}$	$I\alpha_{SM PTAP}$	$V_{PTAP SM}$	$R_{PTAP SM}$	$FR_{PTAP SM}$
Pozos de captación (PC)	A_{SM}	$I_{S fPC+oPC}$	$I\alpha_{SM PC}$	$V_{PC SM}$	$R_{PC SM}$	$FR_{PC SM}$
Red de Distribución (RD)	A_{SM}	$I_{S fRD+oRD}$	$I\alpha_{SM RD}$	$V_{RD SM}$	$R_{RD SM}$	$FR_{RD SM}$
Red de Transporte (RT)	A_{SM}	$I_{S fRT+oRT}$	$I\alpha_{SM RT}$	$V_{RT SM}$	$R_{RT SM}$	$FR_{RT SM}$

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.2.2. Riesgo Sísmico del Sistema de Saneamiento

Tabla 47 Riesgo sísmico Sistema de Saneamiento.

Tipología infraestructura	Amenaza sísmica (A_{SM}) *($\sum F_{psM}$)	Susceptibilidad (S_i)	Resiliencia sísmica (α_{SM}) [$U_{CSM} * Daño^{-1}$]	Vulnerabilidad Sísmica [$U_{CSM} * Daño^{-1}$]	Riesgo sísmico (R_{kSM}) [Daño]	Factor riesgo sísmico unitario (FR_{kSM}). [Daño]
Plantas Elevadoras de aguas servidas (PEAS)	A_{SM}	$I_S f_{PEAS+oPEAS}$	$I\alpha_{SM} PEAS$	$V_{PEAS SM}$	$R_{PEAS SM}$	$FR_{PEAS SM}$
Plantas Tratamiento de aguas servidas (PTAS)	A_{SM}	$I_S f_{PTAS+oPTAS}$	$I\alpha_{SM} PTAS$	$V_{PTAS SM}$	$R_{PTAS SM}$	$FR_{PTAS SM}$
Red de Alcantarillado (RAS)	A_{SM}	$I_S f_{RAS+oRAS}$	$I\alpha_{SM} RAS$	$V_{RAS SM}$	$R_{RAS SM}$	$FR_{RAS SM}$

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.3. Riesgo Volcánico

3.7.2.3.1. Riesgo Volcánico del Sistema de Abastecimiento

Tabla 48 Riesgo volcánico Sistema de Abastecimiento.

Tipología infraestructura	Amenaza volcánica (A_V) *($\sum F_{pv}$)	Susceptibilidad (Si)	Resiliencia volcánica (α_V) [$U_{Cv} * Daño^{-1}$]	Vulnerabilidad Volcánica [$U_{Cv} * Daño^{-1}$]	Riesgo volcánico (R_{kv}) [Daño]	Factor de riesgo volcánico unitario (FR_{kv}). [Daño]
Acueductos (AC)	A_V	$I_{S fAC+oAC}$	$I\alpha_{V AC}$	$V_{AC V}$	$R_{AC V}$	$FR_{AC V}$
Captaciones Superficiales (CS)	A_V	$I_{S fCS+oCS}$	$I\alpha_{V CS}$	$V_{CS V}$	$R_{CS V}$	$FR_{CS V}$
Embalses (EMB)	A_V	$I_{S fEMB+oEMB}$	$I\alpha_{V EMB}$	$V_{EMB V}$	$R_{EMB V}$	$FR_{EMB V}$
Estanques (EST)	A_V	$I_{S fEST+oEST}$	$I\alpha_{V EST}$	$V_{EST V}$	$R_{EST V}$	$FR_{EST V}$
Plantas Elevadores de agua potable (PEAP)	A_V	$I_{S fPEAP+oPEAP}$	$I\alpha_{V PEAP}$	$V_{PEAP V}$	$R_{PEAP V}$	$FR_{PEAP V}$
Plantas Tratamiento de agua potable (PTAP)	A_V	$I_{S fPTAP+oPTAP}$	$I\alpha_{V PTAP}$	$V_{PTAP V}$	$R_{PTAP V}$	$FR_{PTAP V}$
Pozos de captación (PC)	A_V	$I_{S fPC+oPC}$	$I\alpha_{V PC}$	$V_{PC V}$	$R_{PC V}$	$FR_{PC V}$
Red de Distribución (RD)	A_V	$I_{S fRD+oRD}$	$I\alpha_{V RD}$	$V_{RD V}$	$R_{RD V}$	$FR_{RD V}$
Red de Transporte (RT)	A_V	$I_{S fRT+oRT}$	$I\alpha_{V RT}$	$V_{RT V}$	$R_{RT V}$	$FR_{RT V}$

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.3.2. Riesgo Volcánico del Sistema de Saneamiento

Tabla 49 Riesgo volcánico Sistema de Saneamiento.

Tipología infraestructura	Amenaza volcánica (A_V) *($\sum F_{pV}$)	Susceptibilidad (S_i)	Resiliencia volcánica (α_V) [$U_{cV} * Daño^{-1}$]	Vulnerabilidad Volcánica [$U_{cV} * Daño^{-1}$]	Riesgo volcánico (R_{kV}) [Daño]	Factor de riesgo volcánico unitario (FR_{kV}). [Daño]
Plantas Elevadoras de aguas servidas (PEAS)	A_V	$I_{S f_{PEAS+oPEAS}}$	$I\alpha_V PEAS$	$V_{PEAS V}$	$R_{PEAS V}$	$FR_{PEAS V}$
Plantas Tratamiento de aguas servidas (PTAS)	A_V	$I_{S f_{PTAS+oPTAS}}$	$I\alpha_V PTAS$	$V_{PTAS V}$	$R_{PTAS V}$	$FR_{PTAS V}$
Red de Alcantarillado (RAS)	A_V	$I_{S f_{RAS+oRAS}}$	$I\alpha_V RAS$	$V_{RAS V}$	$R_{RAS V}$	$FR_{RAS V}$

Fuente: Elaboración propia.

3.7.3. Resumen de Riesgos

Analizados los indicadores de susceptibilidad, tanto física como operativa, de resiliencia específica de amenaza específica (hidrológica, remoción en masa, sísmica, y volcánica), se obtienen los riesgos específicos y el grado de afectación de cada tipología de componente básico de la infraestructura hidráulica. A continuación, se describe cada uno de éstos en la Tabla 50. Hernández Rodríguez, L.C., (2012).

Tabla 50 Resumen de riesgos específicos y Componentes de la Infraestructura hidráulica.

Tipología infraestructura hidráulica	Riesgo Hidrológico (R_H)	Riesgos geológicos			Riesgo medio Total (R_{KT}) [Daño]	Grado de riesgo ($R_{KT}/\sum R_{KT}$) %
		Riesgo de Remociones en masa (R_{RM})	Riesgo Sísmico (R_{SM})	Riesgo volcánico (R_V)		
Acueductos (AC)	R_{ACH}	R_{ACRM}	R_{ACSM}	R_{ACV}	R_{ACT}	$R_{ACT}/\sum R_{ACT}$
Captaciones Superficiales (CS)	R_{CSH}	R_{CSR}	R_{CSSM}	R_{CSV}	R_{CST}	$R_{CST}/\sum R_{CST}$
Embalses (EMB)	R_{EMH}	R_{EMRM}	R_{EMSM}	R_{EMV}	R_{EMT}	$R_{EMT}/\sum R_{EMT}$
Estanques (EST)	R_{ESTH}	R_{ESTRM}	R_{ESTSM}	R_{ESTV}	R_{ESTT}	$R_{ESTT}/\sum R_{ESTT}$
Plantes Elevadores de agua potable (PEAP)	R_{PEAPH}	R_{PEAPRM}	R_{PEAPSM}	R_{PEAPV}	R_{PEAPT}	$R_{PEAPT}/\sum R_{PEAPT}$
Plantas Tratamiento de agua potable (PTAP)	R_{PTAPH}	R_{PTAPRM}	R_{PTAPSM}	R_{PTAPV}	R_{PTAPT}	$R_{PTAPT}/\sum R_{PTAPT}$
Pozos de captación (PC)	R_{PCH}	R_{PCRM}	R_{PCSM}	R_{PCV}	R_{PCT}	$R_{PCT}/\sum R_{PCT}$
Red de Distribución (RD)	R_{RDH}	$R_{RD RM}$	$R_{RD SM}$	$R_{RD V}$	R_{RDT}	$R_{RDT}/\sum R_{RDT}$
Red de Transporte (RT)	R_{RTH}	R_{RTRM}	R_{RTSM}	R_{RTV}	R_{RTT}	$R_{RTT}/\sum R_{RTT}$
Plantas Elevadoras de aguas servidas (PEAS)	R_{PEASH}	R_{PEASRM}	R_{PEASSM}	R_{PEASV}	R_{PEAST}	$R_{PEAST}/\sum R_{PEAST}$
Plantas Tratamiento de aguas servidas (PTAS)	R_{PTASH}	R_{PTASRM}	R_{PTASSM}	R_{PTASV}	R_{PTAST}	$R_{PTAST}/\sum R_{PTAST}$
Red de Alcantarillado (RAS)	R_{RASH}	R_{RASRM}	R_{RASSM}	R_{RASV}	R_{RAST}	$R_{RAST}/\sum R_{RAST}$

Fuente: Elaboración propia.

$$R_{ki} [Daño] = A_k [Uc_k] \cdot \left(\frac{S_i []}{\alpha_{ki} [Uc_k \cdot Daño^{-1}]} \right) \quad (26)$$

$$R_{ki} [Daño] = Pp_k [Uc_k] \cdot \prod_{g=1}^{G(k)} Fp_{kg} \cdot \left(\frac{\left(\sum_{d=1}^{F_i} Ws_{fid} \cdot Is_{fid} + \sum_{j=1}^{O_i} Ws_{oj} \cdot Iso_{ij} \right) []}{\left(\sum_{l=1}^{L_{ki}} W\alpha_{kil} \cdot I\alpha_{kil} \right) [Uc_k \cdot Daño^{-1}]} \right) \quad (27)$$

$$R_{ki} [Daño] = \sum_{k=1}^{k=n} Ri = \frac{R_{Hi}}{\sum_{k=1}^{k=n} R_{ki}} + \frac{R_{RMI}}{\sum_{k=1}^{k=n} R_{ki}} + \frac{R_{SMI}}{\sum_{k=1}^{k=n} R_{ki}} + \frac{R_{Vi}}{\sum_{k=1}^{k=n} R_{ki}} \quad (28)$$

$$Grado \ de \ Riesgo \ (GR_i) = \frac{R_{kTi}}{\sum_{k=1}^{k=n} R_{kTi}} [] \quad (29)$$

A continuación, a título de ejemplo, se adjunta la *Figura 15* con el grado de riesgo de cada componente básico de la Infraestructura hidráulica analizada.

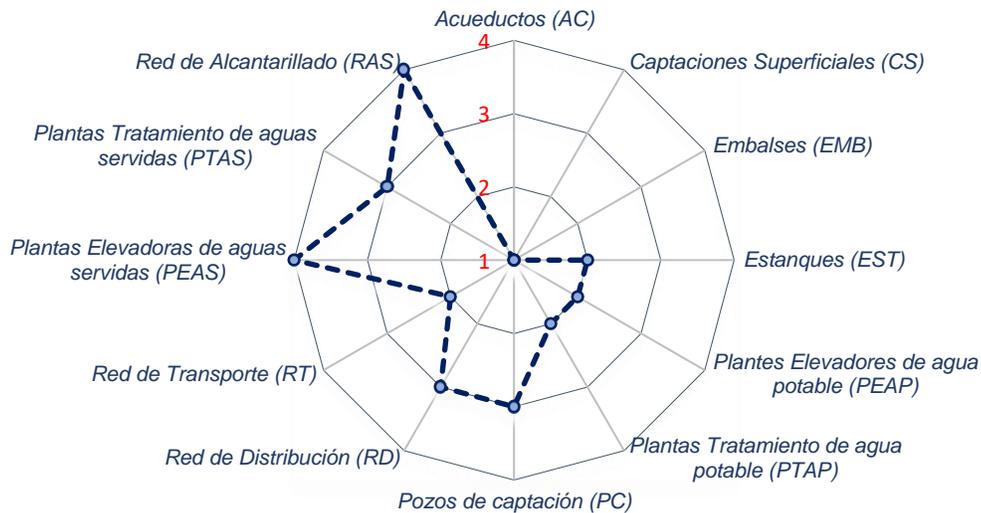


Figura 15 Criticidad de los componentes de la Infraestructura hidráulica en un Sistema Complejo.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis se ha realizado en base a la estimación de los niveles de criticidad de cada componente en la operación del Sistema de abastecimiento. Dichos niveles dependerán de la tipología física y operacional del Sistema de Infraestructuras hidráulicas a analizar.

A continuación, se propone una estimación de grado de criticidad y el grado de riesgo en un Sistema Complejo.

Tabla 51 Niveles de criticidad y grado de riesgo. Caso de aplicación.

Tipología infraestructura hidráulica	Nivel de criticidad estimado s/Sistema	Grado de riesgo (RkTi/∑RkTi)
Acueductos (AC)	1	10,17%
Captaciones Superficiales (CS)	1	9,44%
Embalses (EMB)	1	10,30%
Estanques (EST)	2	7,08%
Plantes Elevadores de agua potable (PEAP)	2	8,90%
Plantas Tratamiento de agua potable (PTAP)	2	10,15%
Pozos de captación (PC)	3	7,28%
Red de Distribución (RD)	3	7,16%
Red de Transporte (RT)	2	7,28%
Plantas Elevadoras de aguas servidas (PEAS)	4	7,22%
Plantas Tratamiento de aguas servidas (PTAS)	3	6,90%
Red de Alcantarillado (RAS)	4	8,12%

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 16 expresa la cuantificación de las diferentes tipologías de riesgo establecidas en la investigación analizada.

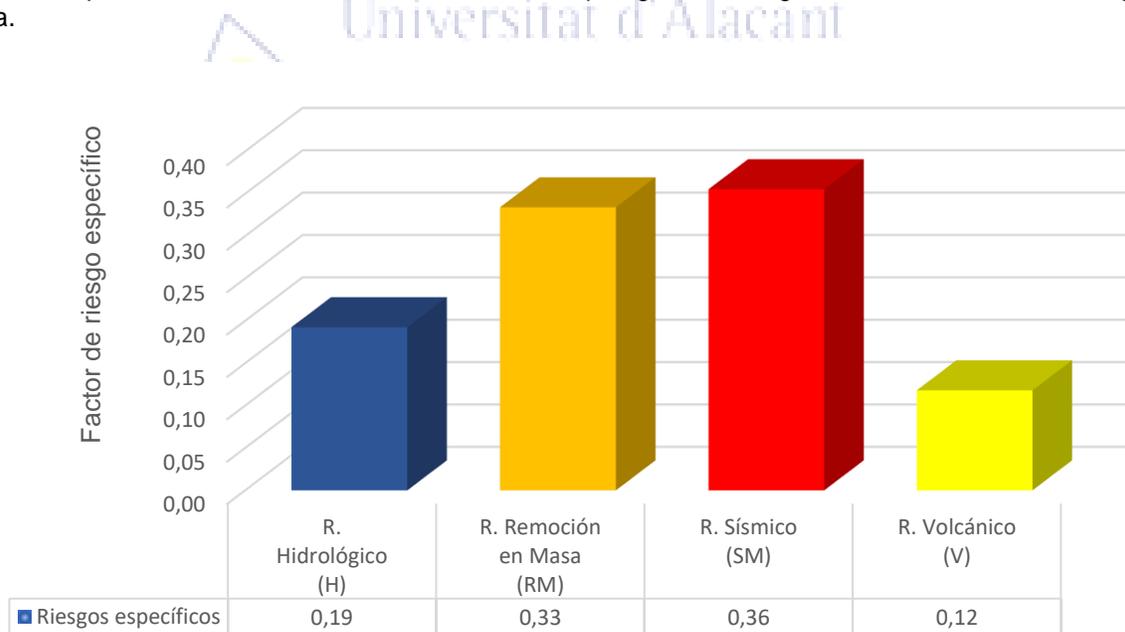


Figura 16: Riesgos específicos. Fuente: Elaboración propia.



4. Resultados y discusión

4.1. Desarrollo metodológico. Modelo inicial

En el desarrollo de la investigación metodológica, se plantearon diversos enfoques de cómo orientar la misma, partiendo de una expresión general de riesgo, dada por Cardona, OD. (2004) en la que aparecían los factores de amenaza o peligro (H), grado de exposición (E), y vulnerabilidad específica (V).

(30)

$$R_{ie}|t = (H_i, V_e)|t$$

En la que se caracteriza cada componente de la infraestructura sin discriminar otras tipologías de indicadores, considerando la vulnerabilidad como un todo, por componente de la infraestructura, para lo que se fijan las variables, parámetros representativos, y se caracterizan las amenazas, en este caso las amenazas hidrológicas (inundación y crecidas), y geológicas (remoción en masa, sísmica, y volcánica).

De manera preliminar, la caracterización de las amenazas se realiza inicialmente, también de manera global, aunque considerando los factores incrementales más característicos que podrían incidir en el agravamiento de sus efectos sobre la infraestructura hidráulica.

Estos indicadores de vulnerabilidad de cada componente de la Infraestructura representarían la caracterización global (susceptibilidad y resiliencia) de la misma, frente a las amenazas seleccionadas.

Es a partir del desarrollo de la investigación cuando se analizarían de forma independiente, aunque integrada, los indicadores de susceptibilidad y de resiliencia que configuran la vulnerabilidad, mejorando así la definición del Sistema, al igual que facilitaría el seguimiento de la resiliencia de cada componente de la Infraestructura hidráulica, además de la vinculación de la resiliencia con las amenazas hidrológica y geológica.

En las ecuaciones (31) y (32) se presenta el detalle del cálculo de la vulnerabilidad (v_{kil}) de cada infraestructura i frente a una amenaza k, los indicadores de vulnerabilidad (Iv_{kil}) miden el daño provocado en la infraestructura, dada una "intensidad" de unidad crítica (Uc_k), y el grado el estado físico y operativo de la misma.

$$v_{ki}[Uc_k \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{nki}} Wv_{kil} \cdot Iv_{kil} [Uc_k \cdot Daño^{-1}] \quad (31)$$

$$V_{ki}^k [Daño \cdot Uc_k^{-1}] = \frac{[Daño]}{[Uck]} \quad (32)$$

Obteniendo finalmente el riesgo específico R_{ki} de cada componente de la Infraestructura, con relación a la amenaza considerada A_k .

$$R_{ki} [Daño] = A_k [Uc_k] \cdot V_{ki}^k [Daño \cdot Uc_k^{-1}] \quad (33)$$

Se establece un modelo, donde mediante la construcción de indicadores de vulnerabilidad, donde se integra la caracterización hidráulica, operacional de la infraestructura y las propiedades de resiliencia frente a las amenazas específicas de la misma, se obtiene la vulnerabilidad específica (V_{ki}^k) como sumatoria de indicadores

clasificando los mismos mediante rangos, y estableciendo clases de vulnerabilidad, basado en investigaciones de Carreño M.L. (2006).

Estas clases de vulnerabilidad se definen a través de una función de distribución que define la evolución de los factores de amenaza y la resiliencia de la infraestructura particular, para cada tipología de amenaza, siendo este análisis un elemento innovador respecto a las metodologías existentes.

La evolución de los indicadores de resiliencia vinculados a la amenaza específica va definiendo la función de distribución de cada factor de amenaza y por ende de la resiliencia de la infraestructura hidráulica, como se constata en esta investigación.

Inicialmente se clasifica el riesgo en dos tipologías, según su origen y los factores potenciales que lo podrían generar, a saber:

Riesgo intrínseco: aquel riesgo generado por la propia infraestructura ya sea por su naturaleza física o material, como por su tipología de operación.

Riesgo extrínseco: el generado como consecuencia de la afectación de la infraestructura por agentes externos, en este caso naturales, de origen hidrológico y geológico.

A continuación, a modo de resumen se desarrolla el proceso que describe la secuencia de desarrollo del análisis de vulnerabilidad:

- 1.- *Parámetros representativos del componente de la infraestructura hidráulica a analizar: físicos y operacionales.*
- 2.- *Composición de indicadores.*
- 3.- *Gradación de indicadores en base a la criticidad en el Sistema.*
- 4.- *Establecimiento de rangos de variación y valores máximos y mínimos (funciones de estado).*
- 5.- *Sumatorio de valores ponderados de los indicadores.*
- 6.- *Función de distribución Logarítmica-normal. Definición de parámetros (mediana y desviación estándar).*
- 7.- *Funciones de fragilidad (abscisas: criticidad del sistema, ordenadas: probabilidad de afectación o daño del componente).*
- 8.- *Función de daño del componente, en función al tipo de riesgo y el parámetro crítico correspondiente.*

Seguidamente se muestra la secuencia de análisis y caracterización de la vulnerabilidad de la Infraestructura hidráulica.



Figura 17 Esquema de análisis de desarrollo del análisis de vulnerabilidad de la Infraestructura Hidráulica Urbana. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se representa el esquema de desarrollo del modelo inicial desarrollado, con indicación de los flujos más representativos.

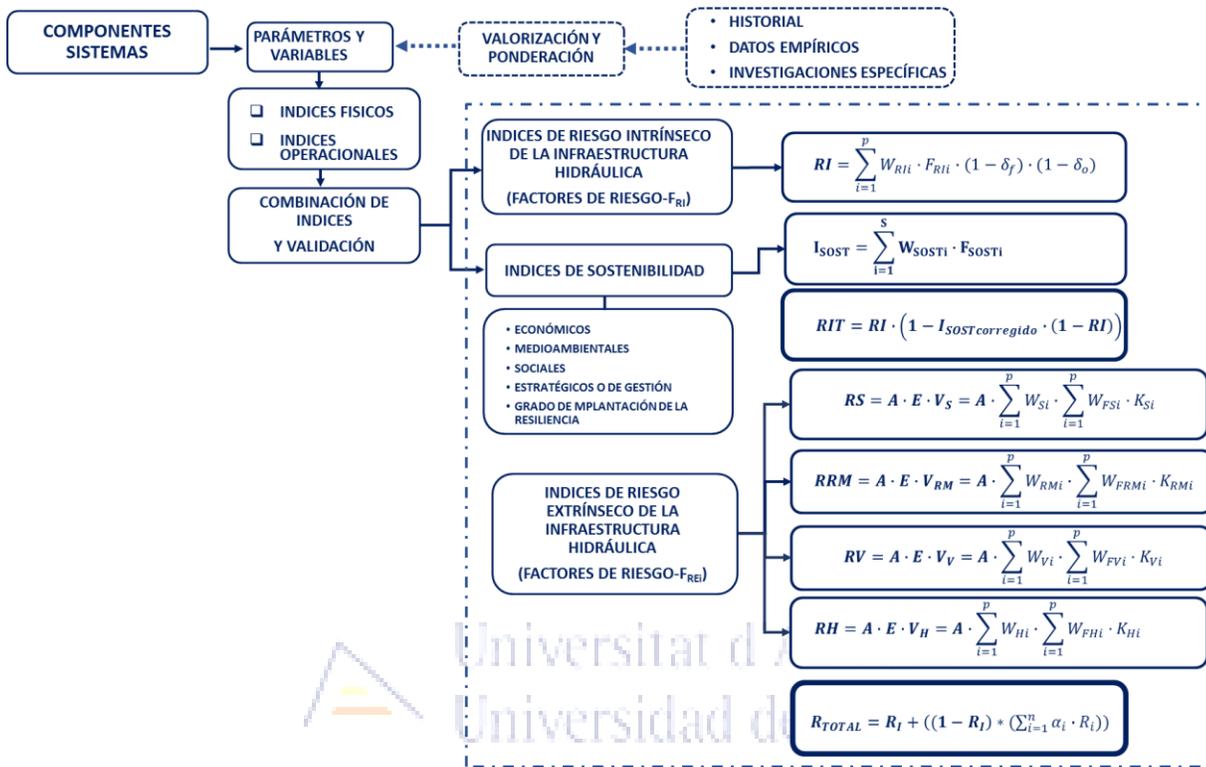


Figura 18 Esquema de desarrollo metodológico. Modelo inicial. Fuente: Elaboración propia.

Siendo,

- $I_{R,TOTAL}$ = índice de riesgo total
- I_{RIT} = índice de riesgo intrínseco total ($I_{RI} + I_{SOST\text{correctado}}$)
- I_{RI} = índice de riesgo intrínseco
- I_{RE} = índice de riesgo extrínseco
- I_{SOST} = índice de sustentabilidad
- I_{RFO} = índice de riesgo físico y operacional
- I_{RS} = índice de riesgo sísmico
- I_{RRM} = índice de riesgo de remoción en masa
- I_{RV} = índice de riesgo volcánico
- I_{RH} = índice de riesgo hidrológico

La suma debidamente ordenada de los indicadores permite obtener la valoración o el indicador de vulnerabilidad del componente analizado.

Las variables de entrada o inputs, su combinación y la secuenciación de estas, adquieren, por tanto, una gran trascendencia en la definición de la vulnerabilidad intrínseca de la infraestructura. A continuación, se desarrolla la estructura metodológica propuesta:

Riesgo físico (Rf) (34)

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{Índice}_{F_{RIF1}} \dots \dots \dots \text{Ponderación } W_{RIF1} \\
 \text{Índice}_{F_{RIF2}} \dots \dots \dots \text{Ponderación } W_{RIF2} \\
 \text{Índice}_{F_{RIF3}} \dots \dots \dots \text{Ponderación } W_{RIF3} \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \text{Índice}_{F_{RIFi}} \dots \dots \dots \text{Ponderación } W_{RIFi}
 \end{array} \right\} V.I.F. = \sum_{i=1}^p W_{RIFi} \cdot F_{RIFi} = RIF = \sum_{i=1}^p W_{RIFi} \cdot F_{RIFi} \cdot (1 - \delta_f)$$

Para las Infraestructuras de alcantarillado $\delta_f = 0$

Riesgo operacional (Ro) (35)

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{Índice}_{F_{RIO1}} \dots \dots \dots \text{Ponderación } W_{RIO1} \\
 \text{Índice}_{F_{RIO2}} \dots \dots \dots \text{Ponderación } W_{RIO2} \\
 \text{Índice}_{F_{RIO3}} \dots \dots \dots \text{Ponderación } W_{RIO3} \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \text{Índice}_{F_{RIOi}} \dots \dots \dots \text{Ponderación } W_{RIOi}
 \end{array} \right\} V.I.O. = \sum_{i=1}^p W_{RIOi} \cdot F_{RIOi} = RIO = \sum_{i=1}^p W_{RIOi} \cdot F_{RIOi} \cdot (1 - \delta_o)$$

$$\left. \begin{array}{l}
 R.I.F. = \sum_{i=1}^p W_{RIFi} \cdot F_{RIFi} \cdot (1 - \delta_f) \\
 R.I.O. = \sum_{i=1}^p W_{RIOi} \cdot F_{RIOi} \cdot (1 - \delta_o)
 \end{array} \right\} RI = VIFO \cdot (1 - \delta_f) \cdot (1 - \delta_o) = \sum_{j=1}^{n_{ji}} W_{TRIji} \cdot F_{TRIji} \leq 1$$

Siendo:

- Riesgos Intrínsecos de la Infraestructura (RIT)

$RI = \sum_{j=1}^{n_{ji}} W_{TRIji} \cdot F_{TRIji}$ es el riesgo Intrínseco de la Infraestructura Hidráulica.

$$I_{SOST} = \sum_{i=1}^s W_{SOSTi} \cdot F_{SOSTi} \tag{37}$$

Para obtener el indicador de Riesgo intrínseco total (IRIT) de la Infraestructura hidráulica, el indicador de riesgo intrínseco (IRI) estará afectado a su vez por el indicador de sustentabilidad corregido ($I_{SOST\text{corregido}}$), mediante la siguiente expresión:

$$I_{SOST\text{corregido}} = I_{SOST} \cdot \delta \tag{38}$$

Siendo δ el coeficiente de confiabilidad de la infraestructura hidráulica, dependiente de la vulnerabilidad del componente de la Infraestructura o de la Infraestructura hidráulica en su conjunto, adoptando la siguiente expresión,

$$\delta = (1 - I_{V \text{ comp. Infr.}}) \quad (39)$$

El indicador de vulnerabilidad de la Infraestructura hidráulica, I_V , es el obtenido en al calcular la vulnerabilidad intrínseca, física y operacional (V_{IFO})

Y finalmente se obtiene el Riesgo Intrínseco Total (RIT),

$$RIT = RI \cdot (1 - I_{SOST \text{ corregido}} \cdot (1 - RI)) \quad (40)$$

▪ Riesgos Extrínsecos de la Infraestructura (RE)

$$\text{Riesgo sísmico, } RS = A_S \cdot \sum_{i=1}^p W_{Si} \cdot \sum_{i=1}^p W_{FS} \cdot K_{Si} \quad (41)$$

$$\text{Riesgo remoción en masa, } RRM = A_{RM} \cdot \sum_{i=1}^p W_{RMI} \cdot \sum_{i=1}^p W_{FRM} \cdot K_{RMI} \quad (42)$$

$$\text{Riesgo volcánico, } RV = A_V \cdot \sum_{i=1}^p W_{Vi} \cdot \sum_{i=1}^p W_{FV} \cdot K_{Vi} \quad (43)$$

$$\text{Riesgo hidrológico, } RH = A_H \cdot \sum_{i=1}^p W_{Hi} \cdot \sum_{i=1}^p W_{FH} \cdot K_{Hi} \quad (44)$$

Siendo,

A_S = amenaza sísmica

A_{RM} = amenaza de remoción en masa

A_V = amenaza volcánica

A_H = amenaza hidrológica

$\sum_{i=1}^p W_{Si}$ = categoría de exposición riesgo sísmico.

$\sum_{i=1}^p W_{RMI}$ = categoría de exposición riesgo remoción en masa.

$\sum_{i=1}^p W_{Vi}$ = categoría de exposición riesgo volcánico.

$\sum_{i=1}^p W_{Hi}$ = categoría de exposición riesgo hidrológico.

$\sum_{i=1}^p W_{FSi}$ = valores ponderados según la criticidad parámetros o factores sísmicos.

$\sum_{i=1}^p W_{FRMi}$ = valores ponderados según criticidad parámetros o factores de remoción en masa.

$\sum_{i=1}^p W_{FVi}$ = valores ponderados según la criticidad de parámetros o factores volcánicos.

$\sum_{i=1}^p W_{FHi}$ = valores ponderados según la criticidad de parámetros o factores hidrológicos.

$\sum_{i=1}^p K_{FSi}$ = valor de clase del parámetro o factor de vulnerabilidad sísmica.

$\sum_{i=1}^p K_{FRMi}$ = valor de clase del parámetro o factor de vulnerabilidad de remoción en masa.

$\sum_{i=1}^p K_{FVi}$ = valor de clase del parámetro o factor de vulnerabilidad volcánica.

$\sum_{i=1}^p K_{FHi}$ = valor de clase del parámetro o factor de vulnerabilidad hidrológica

- n_{ji} , el número de factores contribuyentes al riesgo intrínseco de la infraestructura (físico y operacional), debido a la amenaza natural i (H_i).

- F_{TRji} , factor contribuyente j al riesgo físico y operacional de la infraestructura debido a la amenaza i .

- W_{TRIji} , peso de la participación del factor contribuyente F_{TRji} , al riesgo físico y operacional.

· $\delta_f =$ **índice de disponibilidad de recurso (Abastecimiento)**

Este indicador se mide en base al % de población que es posible abastecer durante 1 día, es decir la cantidad de recurso disponible de recurso para 24 horas.

Tabla 52 Población abastecida e indicador de disponibilidad del recurso.

Población abastecida (%)	δ_f
0%	0,000
25%	0,050
50%	0,100
75%	0,150
100%	0,200

Fuente: Elaboración propia

· $\delta_o =$ **índice de continuidad o nivel de servicio.**

Este índice se define numéricamente mediante la siguiente expresión,

$$\delta_o = \left(1 - \frac{\sum(t_p \cdot C_i)}{H_t \cdot C_S} \right)$$

(45)

$H_t =$ n^o horas totales de servicio al año (8.760 horas).

$t_p =$ horas anuales de interrupción del servicio.

$C_i =$ n^o de usuarios afectados por los episodios de interrupción del servicio (horas).

$C_S =$ n^o de usuarios totales (habitantes)

Tabla 53 Nivel de continuidad del servicio e indicador de calidad.

Nivel de continuidad (C)	δ_o
$C < 90$	0,000
$0,90 \leq C < 0,94$	0,050
$0,94 \leq C < 0,97$	0,100
$0,97 \leq C < 0,99$	0,150
$C \geq 0,99$	0,200

Fuente: Elaboración propia

4.2. Jerarquización de indicadores

A continuación, se describen los valores y ponderaciones correspondientes a las diferentes tipologías de indicadores que definen los componentes o subcomponentes básicos seleccionados, de un Sistema de Infraestructuras hidráulicas. Esta descripción y ponderación de valores se realiza previa caracterización de la infraestructura hidráulica, por componente básico desde el punto de vista operacional, atribuyéndole una criticidad en el conjunto del Sistema.

En este caso, las investigaciones de Barbat y Cardona, (2003), aunque plantean la construcción de los indicadores, no alcanzan un grado de definición que realmente genere un valor añadido a la representatividad de estos.

Los indicadores definidos corresponden a las siguientes tipologías y clases:

- Indicadores de susceptibilidad: Los indicadores de susceptibilidad de la infraestructura representarían la fragilidad, de la misma referida a su caracterización física (de los componentes constitutivos y equipamiento específico), además de su caracterización operacional (variables y parámetros de operación).
- Indicadores de Resiliencia: representarían la capacidad de respuesta de un sistema de infraestructura hidráulica frente a una amenaza extrínseca específica. Cada componente de la infraestructura hidráulica estaría caracterizado por una tipología de indicadores específicos, frente a una determinada amenaza, en un proceso dinámico de adaptación, y un entorno holístico del riesgo.

Las tipologías de componentes de la Infraestructura hidráulica analizados en la presente investigación son los siguientes:

- Acueducto (A.C.).
- Captación Superficial (C.S.).
- Embalse (EMB.).
- Estanque (EST.).
- Planta Elevadora de Agua Potable (P.E.A.P.).
- Planta de Tratamiento de agua Potable (P.T.A.P.).
- Pozos de Captación (P.C.).
- Red de Distribución (R.D.).
- Red de Transporte (R.T.).
- Planta Elevadora de Aguas Servidas (P.E.A.S.).
- Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (P.E.A.S.).
- Planta de Tratamiento de Aguas servidas (P.T.A.S.).
- Red de Aguas Servidas (R.A.S.).

Los indicadores, de susceptibilidad se han clasificado en orden a su tipología (física u operacional), considerando físicos aquellos que en mayor grado caracterizan a la infraestructura en su acepción material, número de elementos estructurales, equipamiento específico, propiedades y referencias identificativas de su naturaleza, antigüedad, ...; y operacionales aquellos que, en base a variables y parámetros operativos del Sistema, permiten definir su grado de gestión funcional.

Con relación a los indicadores de resiliencia, estos, como ya se ha indicado caracterizan el grado de respuesta de cada componente con relación a cada amenaza específica, caracterizando ésta última en un ámbito de afectación micro zonal, y analizándolos puntos críticos de la Infraestructura hidráulica, desde el punto de vista de la continuidad del servicio y de la garantía de la calidad del agua.

La selección de parámetros y variables que constituyen los indicadores se ha realizado en base a juicios expertos, e información empírica recabada de la gestión de infraestructuras de hidráulicas, de abastecimiento y de alcantarillado urbano.

Cada indicador se encuadra en unos determinados rangos, considerados en base a bandas de desarrollo según el Sistema de Infraestructuras determinado, los cuales quedan recogidos en el desarrollo de la investigación. La fijación de esta banda de evolución de los rangos de los indicadores plantea a su vez la determinación de valores extremos (mínimo y máximo) que permiten definir la evolución temporal de cada componente de la infraestructura hidráulica.

La valoración, y la ponderación (w) de los indicadores permiten estimar o establecer un primer nivel criticidad de manera cuantitativa, partiendo de su caracterización cualitativa. Ese nivel referencial desarrollado mediante juicio experto se objetiva aplicando un análisis jerárquico (PAJ) de cada indicador, estableciendo además su vinculación con los demás indicadores representativos de cada componente de la infraestructura hidráulica urbana.

A fin de simplificar la nomenclatura empleada, se han contemplado las siguientes abreviaturas:

$AC_n (AC1, AC2, \dots) \langle \rangle I_{sfAC_n} \text{ o } I_{soAC_n}$
 $CS_n (CS1, CS2, \dots) \langle \rangle I_{sfCS_n} \text{ o } I_{soCS_n}$
 $EMB_n (EMB1, EMB2, \dots) \langle \rangle I_{sfEMB_n} \text{ o } I_{soEMB_n}$
 $EST_n (EST1, EST2, \dots) \langle \rangle I_{sfEST_n} \text{ o } I_{soSTB_n}$
 $PEAP_n (PEAP1, PEAP2, \dots) \langle \rangle I_{sfPEAP_n} \text{ o } I_{soPEAP_n}$
 $PTAP_n (PTAP1, PTAP2, \dots) \langle \rangle I_{sfPTAP_n} \text{ o } I_{soPTAP_n}$
 $PC_n (PC1, PC2, \dots) \langle \rangle I_{sfPC_n} \text{ o } I_{soPC_n}$
 $RD_n (RD1, RD2, \dots) \langle \rangle I_{sfRD_n} \text{ o } I_{soRD_n}$
 $RT_n (RT1, RT2, \dots) \langle \rangle I_{sfRT_n} \text{ o } I_{soRT_n}$
 $PEAS_n (PEAS1, PEAS2, \dots) \langle \rangle I_{sfPEAS_n} \text{ o } I_{soPEAS_n}$
 $PTAS_n (PTAS1, PTAS2, \dots) \langle \rangle I_{sfPTAS_n} \text{ o } I_{soPTAS_n}$
 $PAS_n (PAS1, PAS2, \dots) \langle \rangle I_{sfPAS_n} \text{ o } I_{soPAS_n}$
 Peso del indicador de Susceptibilidad $\langle \rangle W_{sf} \text{ o } W_{so}$

Indicador de resiliencia hidrológica $\langle \rangle I_{\alpha H_n}, n=1, 2, 3, \dots$

Indicador de resiliencia de Remoción en Masa $\langle \rangle I_{\alpha RM_n}, n=1, 2, 3, \dots$

Indicador de resiliencia Sísmica $\langle \rangle I_{\alpha SM_n}, n=1, 2, 3, \dots$

Indicador de resiliencia Volcánica $\langle \rangle I_{\alpha V_n}, n=1, 2, 3, \dots$

Peso del indicado de resiliencia $\langle \rangle w_{\alpha}$



ACUEDUCTO (AC)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)							
	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8
Puntuación inicial (W_{sf} o W_{so})	1.00	0.78	0.78	0.67	0.56	0.44	0.33	0.78
Priorización PAJ	0.838	0.1555	0.1555	0.1370	0.1193	0.1060	0.0876	0.1555

ACUEDUCTO (AC)	INDICADORES DE RESILIENCIA											
	Amenaza Hidráulica			Amenaza de Remoción en masa			Amenaza Sísmica			Amenaza Volcánica		
Puntuación	$I_{\alpha H1}$	$I_{\alpha H2}$	$I_{\alpha H3}$	$I_{\alpha RM1}$	$I_{\alpha RM2}$	$I_{\alpha RM3}$	$I_{\alpha SM1}$	$I_{\alpha SM2}$	$I_{\alpha SM3}$	$I_{\alpha V1}$	$I_{\alpha V2}$	$I_{\alpha V3}$
W_{α}	0.40	0.40	0.20	0.60	0.25	0.15	0.40	0.20	0.40	0.30	0.30	0.40

CAPTACIÓN SUPERFICIAL (CS)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)				
	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5
Puntuación inicial (W_{sf} o W_{so})	1.00	0.89	0.78	0.56	0.33
Priorización PAJ	0.1398	0.12655	0.2397	0.1927	0.1624

CAPTACIÓN SUPERFICIAL (CS)	INDICADORES DE RESILIENCIA											
	Amenaza Hidráulica			Amenaza de Remoción en masa			Amenaza Sísmica			Amenaza Volcánica		
Puntuación	$I_{\alpha H1}$	$I_{\alpha H2}$	$I_{\alpha H3}$	$I_{\alpha RM1}$	$I_{\alpha RM2}$	$I_{\alpha RM3}$	$I_{\alpha SM1}$	$I_{\alpha SM2}$	$I_{\alpha SM3}$	$I_{\alpha V1}$	$I_{\alpha V2}$	$I_{\alpha V3}$
W_{α}	0.40	0.40	0.20	0.60	0.25	0.15	0.40	0.20	0.40	0.30	0.30	0.40

EMBALSE (EMB)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)			
	EMB1	EMB2	EMB3	EMB4
Puntuación inicial (w_{sf} o w_{so})	1.00	0.89	0.78	0.56
Priorización PAJ	0.1975	0.2942	0.2718	0.2365

EMBALSE (EMB)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)			
	EMB1	EMB2	EMB3	EMB4
Puntuación inicial (w_{sf} o w_{so})	1.00	0.89	0.78	0.56
Priorización PAJ	0.1975	0.2942	0.2718	0.2365

ESTANQUE (EST)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)								
	EST1	EST2	EST3	EST4	EST5	EST6	EST7	EST8	EST9
Puntuación inicial (w_{sf} o w_{so})	0.11	1.00	0.78	0.89	0.44	0.56	0.33	0.22	0.67
Priorización PAJ	0.0767	0.1738	0.1384	0.1560	0.0887	0.1045	0.0749	0.0658	0.1212

ESTANQUE (EST)	INDICADORES DE RESILIENCIA											
	Amenaza Hidráulica			Amenaza de Remoción en masa			Amenaza Sísmica			Amenaza Volcánica		
Puntuación	$I_{\alpha H1}$	$I_{\alpha H2}$	$I_{\alpha H3}$	$I_{\alpha RM1}$	$I_{\alpha RM2}$	$I_{\alpha RM3}$	$I_{\alpha SM1}$	$I_{\alpha SM2}$	$I_{\alpha SM3}$	$I_{\alpha V1}$	$I_{\alpha V2}$	$I_{\alpha V3}$
W_{α}	0.40	0.30	0.30	0.30	0.20	0.50	0.40	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40

PLANTA ELEVADORA DE AGUA POTABLE (PEAP)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)						
	PEAP 1	PEAP2	PEAP3	PEAP4	PEAP5	PEAP6	PEAP7
Puntuación inicial (w_{sf} o w_{so})	0.44	0.56	0.56	1.00	0.89	0.78	0.67
Priorización PAJ	0.1035	0.1238	0.1238	0.1871	0.1701	0.1536	0.1380

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)								
	PTAP1	PTAP2	PTAP3	PTAP4	PTAP5	PTAP6	PTAP7	PTAP8	PTAP9
Puntuación inicial (W_{sf} o W_{so})	0.11	1.00	0.89	0.78	0.67	0.56	0.44	0.33	0.22
Priorización PAJ	0.0711	0.1741	0.1564	0.1388	0.1217	0.1051	0.0895	0.0759	0.0674

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP)	INDICADORES DE RESILIENCIA											
	Amenaza Hidráulica			Amenaza de Remoción en masa			Amenaza Sísmica			Amenaza Volcánica		
Puntuación	$I_{\alpha H1}$	$I_{\alpha H2}$	$I_{\alpha H3}$	$I_{\alpha RM1}$	$I_{\alpha RM2}$	$I_{\alpha RM3}$	$I_{\alpha SM1}$	$I_{\alpha SM2}$	$I_{\alpha SM3}$	$I_{\alpha V1}$	$I_{\alpha V2}$	$I_{\alpha V3}$
W_{α}	0.45	0.30	0.25	0.40	0.20	0.40	0.40	0.30	0.30	0.30	0.40	0.30

POZO DE CAPTACIÓN (PC)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Puntuación inicial (W_{sf} o W_{so})	1.00	0.89	0.78	0.67	0.56	0.33
Priorización PAJ	0.1173	0.2228	0.1957	0.1783	0.1580	0.1278

POZO DE CAPTACIÓN (PC)	INDICADORES DE RESILIENCIA											
	Amenaza Hidráulica			Amenaza de Remoción en masa			Amenaza Sísmica			Amenaza Volcánica		
Puntuación	$I_{\alpha H1}$	$I_{\alpha H2}$	$I_{\alpha H3}$	$I_{\alpha RM1}$	$I_{\alpha RM2}$	$I_{\alpha RM3}$	$I_{\alpha SM1}$	$I_{\alpha SM2}$	$I_{\alpha SM3}$	$I_{\alpha V1}$	$I_{\alpha V2}$	$I_{\alpha V3}$
W_{α}	0.25	0.40	0.35	0.40	0.25	0.35	0.30	0.35	0.35	0.30	0.30	0.40

RED DE DISTRIBUCIÓN (RD)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)					
	RD1	RD2	RD3	RD4	RD5	RD6
Puntuación inicial (W_{sf} O W_{so})	1.00	0.89	0.78	0.67	0.56	0.33
Priorización PAJ	0.1173	0.2228	0.1957	0.1783	0.1580	0.1278

RED DE DISTRIBUCIÓN (RD)	INDICADORES DE RESILIENCIA											
	Amenaza Hidráulica			Amenaza de Remoción en masa			Amenaza Sísmica			Amenaza Volcánica		
Puntuación	$I_{\alpha H1}$	$I_{\alpha H2}$	$I_{\alpha H3}$	$I_{\alpha RM1}$	$I_{\alpha RM2}$	$I_{\alpha RM3}$	$I_{\alpha SM1}$	$I_{\alpha SM2}$	$I_{\alpha SM3}$	$I_{\alpha V1}$	$I_{\alpha V2}$	$I_{\alpha V3}$
W_{α}	0.35	0.35	0.30	0.40	0.20	0.40	0.30	0.35	0.35	0.30	0.30	0.40

RED DE TRANSPORTE (RT)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)			
	RT1	RT2	RT3	RT4
Puntuación inicial (W_{sf} O W_{so})	1.00	0.89	0.78	0.56
Priorización PAJ	0.1975	0.2942	0.2718	0.2365

RED DE TRANSPORTE (RT)	INDICADORES DE RESILIENCIA											
	Amenaza Hidráulica			Amenaza de Remoción en masa			Amenaza Sísmica			Amenaza Volcánica		
Puntuación	$I_{\alpha H1}$	$I_{\alpha H2}$	$I_{\alpha H3}$	$I_{\alpha RM1}$	$I_{\alpha RM2}$	$I_{\alpha RM3}$	$I_{\alpha SM1}$	$I_{\alpha SM2}$	$I_{\alpha SM3}$	$I_{\alpha V1}$	$I_{\alpha V2}$	$I_{\alpha V3}$
W_{α}	0.30	0.30	0.40	0.40	0.20	0.40	0.30	0.30	0.40	0.30	0.30	0.40

PLANTA ELEVADORA DE AGUAS SERVIDAS (PEAS)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)						
	PEAS1	PEAS2	PEAS3	PEAS4	PEAS5	PEAS6	PEAS7
Puntuación inicial (W_{sf} O W_{so})	1.00	0.78	0.44	0.89	0.56	0.67	0.44
Priorización PAJ	0.0497	0.1957	0.1118	0.2236	13.98	16.77	11.18

PLANTA ELEVADORA DE AGUAS SERVIDAS (PEAS)	INDICADORES DE RESILIENCIA											
	Amenaza Hidráulica			Amenaza de Remoción en masa			Amenaza Sísmica			Amenaza Volcánica		
Puntuación	$I_{\alpha H1}$	$I_{\alpha H2}$	$I_{\alpha H3}$	$I_{\alpha RM1}$	$I_{\alpha RM2}$	$I_{\alpha RM3}$	$I_{\alpha SM1}$	$I_{\alpha SM2}$	$I_{\alpha SM3}$	$I_{\alpha V1}$	$I_{\alpha V2}$	$I_{\alpha V3}$
W_{α}	0.30	0.50	0.20	0.35	0.30	0.35	0.30	0.35	0.40	0.30	0.30	0.40

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS (PTAS)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)							
	PTAS1	PTAS2	PTAS3	PTAS4	PTAS5	PTAS6	PTAS7	PTAS8
Puntuación inicial (W_{sf} o W_{so})	1.00	0.89	0.78	0.67	0.56	0.44	0.33	0.22
Priorización PAJ	0.0767	0.1738	0.1384	0.1560	0.0887	0.1045	0.0749	0.0658

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAS)	INDICADORES DE RESILIENCIA											
	Amenaza Hidráulica			Amenaza de Remoción en masa			Amenaza Sísmica			Amenaza Volcánica		
Puntuación	I_{aH1}	I_{aH2}	I_{aH3}	I_{aRM1}	I_{aRM2}	I_{aRM3}	I_{aSM1}	I_{aSM2}	I_{aSM3}	I_{aV1}	I_{aV2}	I_{aV3}
W_{α}	0.40	0.25	0.35	0.35	0.45	0.20	0.40	0.30	0.30	0.40	0.30	0.30

RED DE AGUAS SERVIDAS (RAS)	INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDAD (FISICOS Y OPERACIONALES)											
	RAS1	RAS2	RAS3	RAS4	RAS5	RAS6	RAS7	RAS8	RAS9	RAS10	RAS11	RAS12
Puntuación inicial (W_{sf} o W_{so})	0.78	0.33	0.11	0.33	0.33	0.33	1.00	0.56	0.33	0.33	0.33	0.33
Priorización PAJ	0.0392	0.1038	0.0424	0.0725	0.0725	0.0725	0.1993	0.1136	0.0725	0.0725	0.0725	0.0666

RED DE AGUAS SERVIDAS (RAS)	INDICADORES DE RESILIENCIA											
	Amenaza Hidráulica			Amenaza de Remoción en masa			Amenaza Sísmica			Amenaza Volcánica		
Puntuación	I_{aH1}	I_{aH2}	I_{aH3}	I_{aRM1}	I_{aRM2}	I_{aRM3}	I_{aSM1}	I_{aSM2}	I_{aSM3}	I_{aV1}	I_{aV2}	I_{aV3}
W_{α}	0.35	0.25	0.40	0.30	0.20	0.50	0.30	0.35	0.35	0.30	0.30	0.40

-  Indicadores de Susceptibilidad física
 Indicadores de Susceptibilidad operacional

4.3. Modelo final

Es a partir del desarrollo de la investigación cuando se analizarían de forma independiente cada tipología de indicador, aunque relacionada, además de la vinculación de la resiliencia con las amenazas hidrológica y geológica.

En la ecuación (46) se presenta el detalle del cálculo de la resiliencia (α_{ki}) de cada infraestructura i frente a una amenaza k , sobre la infraestructura, dada una "intensidad" de unidad crítica (U_{Ck}).

(46)

$$R_{ki} [\text{Daño}] = A_k[U_{Ck}] \cdot V_{ki}[\text{Daño} \cdot U_{Ck}^{-1}]$$

A continuación, se muestra el esquema metodológico finalmente desarrollado, para la obtención del Riesgo específico de los componentes de la Infraestructura hidráulica urbana. *Apartado 3.2*

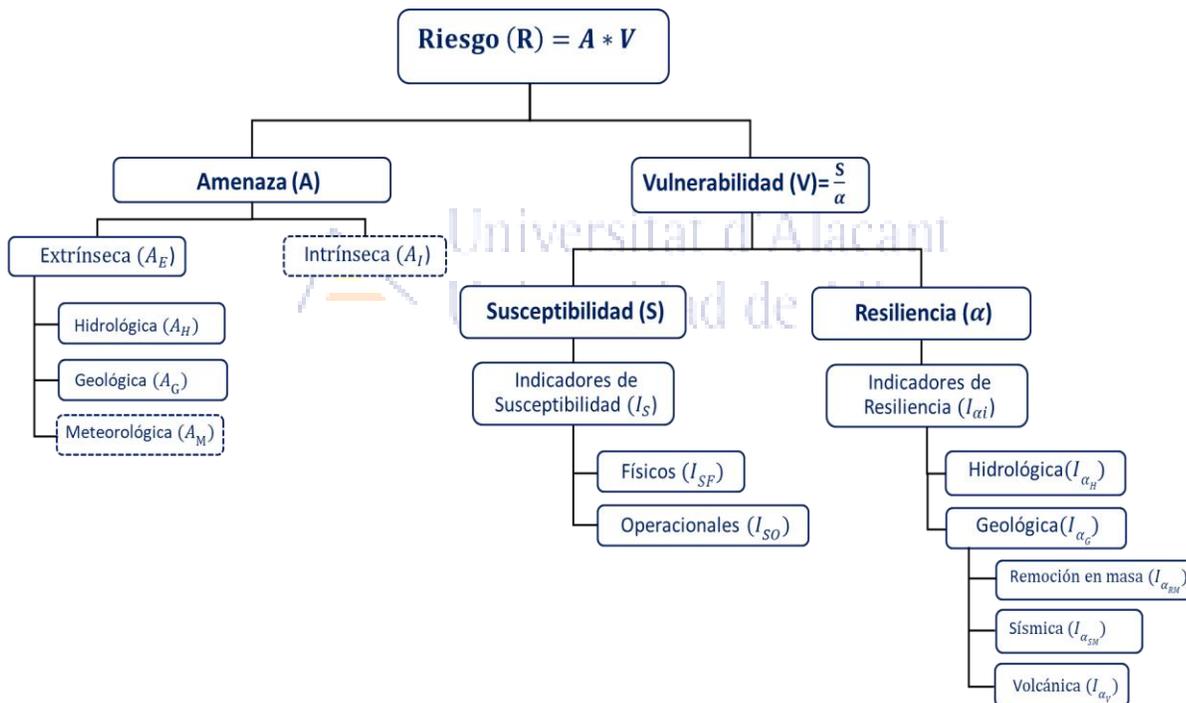


Figura 19 Esquema metodológico. Modelo final. Elaboración propia.

En la ecuación (47) se presenta la amenaza (A_k) para cada una de las k amenazas, se calcula mediante la multiplicación entre el parámetro incidente crítico de amenaza o peligro (Pp_k) y la pitatoria de los $G(k)$ factores de amenaza o peligro (Fp_{kg}), los cuales pueden acentuar o atenuar la incidencia del parámetro crítico.

(47)

$$A_k[U_{Ck}] = Pp_k[U_{Ck}] \cdot \prod_{g=1}^{G(k)} Fp_{kg}$$

En la ecuación (48) se presenta la amenaza (A_k) para cada una de las k amenazas, se calcula mediante la multiplicación entre el parámetro incidente crítico de amenaza o peligro (Pp_k) y la pitatoria de los $G(k)$ factores de amenaza o peligro (Fp_{kg}), los cuales pueden acentuar o atenuar la incidencia del parámetro crítico.

$$A_k[Uc_k] = A_{k0}[Uc_k] \cdot \left(\prod_{g=1}^{G(k)} Fp_{kg} \right) \quad (48)$$

En la ecuación (49) 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}).

$$V_{ki} [Daño \cdot Uc_k^{-1}] = \frac{S_i []}{\alpha_{ki} [Uc_k \cdot Daño^{-1}]} \quad (49)$$

En la ecuación (50) se presenta el detalle del cálculo 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 de cada componente del sistema de infraestructura hidráulica.

$$S_i [] = Sf_i [] + So_i [] = \sum_{n=1}^{F_i} Ws_{fin} \cdot Is_{fin} + \sum_{j=1}^{O_i} Ws_{oj} \cdot Iso_{oj} \quad (50)$$

En la ecuación (51) 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 ($I\alpha_{kil}$).

$$\alpha_{ki} [Uc_k \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{ki}} W\alpha_{kil} \cdot I\alpha_{kil} [Uc_k \cdot Daño^{-1}] \quad (51)$$

La resiliencia obtenida de cada componente se adapta a su vez, según los rangos de amenaza función del parámetro crítico seleccionado y los factores de amenaza correspondientes, así como de los rangos de resiliencia establecidos, según lo indicado en la Tabla 9.

Obtenidos los indicadores de susceptibilidad y de resiliencia específicos de cada amenaza, se homogenizan sus valores, verificando así la expresión (52).

$$\sum_1^i I_{si} + \sum_1^i I_{aki} = 1 \quad (52)$$

Los valores de fluctuación de los indicadores de resiliencia se encuentran entre un valor mínimo de 0.10 y un valor máximo de 1.0. Respecto a los indicadores de susceptibilidad, éstos operan entre un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 1. Todo ello con el fin de evitar indeterminaciones de orden matemático, como de índole práctica, ya que valores inferiores a esas estimaciones propuestas no suelen producirse.

La vulnerabilidad obtenida V_{ki} , según la ecuación (49), de la infraestructura hidráulica, se normalizaría a valores cuyo rango de fluctuación se encuentra entre un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 1.0.

En la tabla adjunta se recogen los valores de vulnerabilidad o matriz de vulnerabilidad, y los valores de los rangos de los indicadores y de resiliencia obtenidos.

Tabla 54 Matriz de Vulnerabilidad.

		Susceptibilidad																				
		0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
Resiliencia	1,00	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
	0,95	0,00	0,05	0,11	0,16	0,21	0,26	0,32	0,37	0,42	0,47	0,53	0,58	0,63	0,68	0,74	0,79	0,84	0,89	0,95	1,00	1,05
	0,90	0,00	0,06	0,11	0,17	0,22	0,28	0,33	0,39	0,44	0,50	0,56	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94	1,00	1,06	1,11
	0,85	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,29	0,35	0,41	0,47	0,53	0,59	0,65	0,71	0,76	0,82	0,88	0,94	1,00	1,06	1,12	1,18
	0,80	0,00	0,06	0,13	0,19	0,25	0,31	0,38	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	1,06	1,13	1,19	1,25
	0,75	0,00	0,07	0,13	0,20	0,27	0,33	0,40	0,47	0,53	0,60	0,67	0,73	0,80	0,87	0,93	1,00	1,07	1,13	1,20	1,27	1,33
	0,70	0,00	0,07	0,14	0,21	0,29	0,36	0,43	0,50	0,57	0,64	0,71	0,79	0,86	0,93	1,00	1,07	1,14	1,21	1,29	1,36	1,43
	0,65	0,00	0,08	0,15	0,23	0,31	0,38	0,46	0,54	0,62	0,69	0,77	0,85	0,92	1,00	1,08	1,15	1,23	1,31	1,38	1,46	1,54
	0,60	0,00	0,08	0,17	0,25	0,33	0,42	0,50	0,58	0,67	0,75	0,83	0,92	1,00	1,08	1,17	1,25	1,33	1,42	1,50	1,58	1,67
	0,55	0,00	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,55	0,64	0,73	0,82	0,91	1,00	1,09	1,18	1,27	1,36	1,45	1,55	1,64	1,73	1,82
	0,50	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00
	0,45	0,00	0,11	0,22	0,33	0,44	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00	1,11	1,22	1,33	1,44	1,56	1,67	1,78	1,89	2,00	2,11	2,22
	0,40	0,00	0,13	0,25	0,38	0,50	0,63	0,75	0,88	1,00	1,13	1,25	1,38	1,50	1,63	1,75	1,88	2,00	2,13	2,25	2,38	2,50
	0,35	0,00	0,14	0,29	0,43	0,57	0,71	0,86	1,00	1,14	1,29	1,43	1,57	1,71	1,86	2,00	2,14	2,29	2,43	2,57	2,71	2,86
	0,30	0,00	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00	1,17	1,33	1,50	1,67	1,83	2,00	2,17	2,33	2,50	2,67	2,83	3,00	3,17	3,33
	0,25	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40	3,60	3,80	4,00
	0,20	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00
	0,15	0,00	0,33	0,67	1,00	1,33	1,67	2,00	2,33	2,67	3,00	3,33	3,67	4,00	4,33	4,67	5,00	5,33	5,67	6,00	6,33	6,67
	0,10	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00
	0,05	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00	19,00	20,00
0,01	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	60,00	65,00	70,00	75,00	80,00	85,00	90,00	95,00	100	

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos valores se obtiene la matriz de vulnerabilidad normalizada, con los valores homogeneizados. Este es otro factor diferenciador respecto a la metodología de Cardona, 2004, ya que éste parte ya de valores homogeneizados, según sus postulados.

En la metodología propuesta se desarrolla todo el proceso desde el inicio, simplificando su obtención mediante matrices, y estableciendo rangos de variación comunes entre los indicadores de susceptibilidad y los indicadores de resiliencia.

Tabla 55 Matriz de Vulnerabilidad Normalizada.

		Susceptibilidad																				
		0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
Resiliencia	1,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10
	0,95	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11
	0,90	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11
	0,85	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12
	0,80	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13
	0,75	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13
	0,70	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14
	0,65	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15
	0,60	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
	0,55	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18
	0,50	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
	0,45	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22
	0,40	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,14	0,15	0,16	0,18	0,19	0,20	0,21	0,23	0,24	0,25
	0,35	0,00	0,01	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10	0,11	0,13	0,14	0,16	0,17	0,19	0,20	0,21	0,23	0,24	0,26	0,27	0,29
	0,30	0,00	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15	0,17	0,18	0,20	0,22	0,23	0,25	0,27	0,28	0,30	0,32	0,33
	0,25	0,00	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40
	0,20	0,00	0,03	0,05	0,08	0,10	0,13	0,15	0,18	0,20	0,23	0,25	0,28	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40	0,43	0,45	0,48	0,50
	0,15	0,00	0,03	0,07	0,10	0,13	0,17	0,20	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,57	0,60	0,63	0,67
	0,10	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
	0,05	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00
0,01	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00	

Fuente: Elaboración Propia.

A partir de la obtención de los valores de los indicadores de vulnerabilidad y de resiliencia se obtiene la vulnerabilidad correspondiente.

La construcción y definición de los rangos, y valores de amenaza asignados, se han obtenido mediante las siguientes expresiones matemáticas, obteniendo una ecuación de evolución de cada uno de ellos.

Inicialmente a partir de los valores iniciales estimados, basados en las investigaciones analizadas que se adjuntan, y mediante la realización de correlaciones experimentales, para cada rango y factor de amenaza, se generan las siguientes expresiones:

$$F_{kn} = f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = A$$

$$F_{kn} = f_0(1) + \left(f_2 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = B$$

$$F_{kn} = f_0(1) + \left(f_n / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = N$$

A partir de estas expresiones se plantea una ecuación de evolución de los nuevos valores obtenidos (A, B, ...,N) para cada rango, mediante la siguiente expresión:

$$F_{kn} = \left(\text{Ln} \left(f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) \right) / f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) \right) + \left(f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) \right) / f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right)$$

Es decir,

$$F_{k1} = (\text{Ln}(A/A) + +(A/A))$$

$$F_{k2} = (\text{Ln}(B/A) + +(B/A))$$

·
·
·

$$F_{kn} = (\text{Ln}(N/A) + +(N/A))$$

Estas expresiones definirían los valores de los factores de amenaza específica de cada rango estimado, y su evolución. Es aquí donde las investigaciones analizadas, de Barbat y Cardona, (2003), aunque definen las amenazas, no desarrollan la caracterización de los factores de amenaza específica, representativos de la misma, y que generarían mayor impacto en el grado de magnitud y de afectación a la infraestructura hidráulica.

La construcción y definición de los rangos y valores de amenaza se han obtenido mediante las siguientes expresiones matemáticas, obteniendo una ecuación de evolución de cada uno de ellos.

Inicialmente a partir de los valores iniciales estimados, basados en las investigaciones analizadas que se adjuntan, y mediante la realización de correlaciones experimentales, para cada rango y factor de amenaza, se generan las siguientes expresiones:

$$F_{pkn} = f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = Akn$$

$$F_{pkn} = f_0(1) + \left(f_2 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = Bkn$$

$$F_{pkn} = f_0(1) + \left(f_n / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) = Nkn$$

A partir de estas expresiones se plantea una ecuación de evolución de los nuevos valores obtenidos (A_{kn} , B_{kn} , ... N_{kn}) para cada rango, mediante la siguiente expresión:

$$F_{pkn} = \left(\text{Ln} \left(f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) / f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) \right) \right) + \left(f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) / f_0(1) + \left(f_1 / \sum_{i=1}^{i=n} f_i \right) \right)$$

Es decir,

$$F_{pk1} = (\text{Ln}(A_{kn}/A_{kn}) + +(A_{kn}/A_{kn}))$$

$$F_{pk2} = (\text{Ln}(B_{kn}/A_{kn}) + +(B_{kn}/A_{kn}))$$

·
·
·

$$F_{pkn} = (\text{Ln}(N_{kn}/A_{kn}) + +(N_{kn}/A_{kn}))$$

Estas expresiones definirían los valores de los factores de amenaza específica de cada rango estimado, y su evolución. Es aquí en este aspecto, donde las metodologías de riesgo carecen de ese grado de definición que, al tiempo de vincular los efectos incrementales de la amenaza, consideran la tipología de afectación particular a la infraestructura. Justamente, es este análisis el que involucra la definición de los indicadores representativos del Sistema de Infraestructuras o sus componentes, siendo ésta otra característica diferenciadora de la metodología de Cardona, (2003); Barbat, (2004); Carreño et al., (2006), y Oliveira, (2006), entre otras. Tal vez, el grado de definición alcanzado por las metodologías de análisis de riesgo, resulta adecuado para el global de las infraestructuras críticas o el entorno urbano en general, pero en particular para la infraestructura hidráulica urbana, y sobre todo desde un enfoque operacional y de gestión integral, resulta insuficiente para su aplicación como herramienta eficaz para gestionar un Sistema de Infraestructuras hidráulicas urbanas.

A continuación, se resumen los factores de amenaza específica propuestos, con indicación de rangos, ponderación y puntaje de estos, además de las principales referencias bibliográficas consultadas y las funciones de distribución en base a dichos rangos y valores indicados:

Tabla 56 Factores de amenaza hidrológica.

Denominación	Ponderación	Rangos y Puntajes						Referencias	Función de distribución
		r1	r2	r3	r4	r5	r6		
Nivel Freático, F (m.)	13%	1.00	1.01	1.02	1.05	1.08	1.13	Vergara, L. & Verdugo Ramón, 2015	$y = 0,005x^2 - 0,0609x + 1,187$ $R^2 = 0,9997$
								Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2010	
								-	
Tipo de terreno (Coef. Permeabilidad, K)	8%	1.00	1.02	1.03	1.05	1.08	-	Hernández, M.A. et. Al., 2009	$y = 0,0017x^2 + 0,0086x + 0,9901$ $R^2 = 0,9994$
								Ollero Ojeda, A., 1996	
								-	
Coef. de Escorrentía (Ce)	6%	1.00	1.01	1.02	1.04	1.06	-	PATRICOVA, 2015	$y = 0,0031x^2 - 0,0029x + 0,9999$ $R^2 = 1$
								Ollero Ojeda, A., 1997	
								Hernández, M.A. et. Al., 2009	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 57 Factores de amenaza de Remoción en masa.

Denominación	Ponderación	Rangos y Puntajes						Referencias	Función de distribución
		r1	r2	r3	r4	r5	r6		
Velocidad de deslizamiento, Vd (mm/s)	9%	1.00	1.01	1.03	1.05	1.09	-	Lara, 2007	$y = 0,0044x^2 - 0,0042x + 0,9997$ $R^2 = 1$
								Muñoz, 2013	
								Vargas Cuervo, 2000	
Intensidad de Precipitación, I ₂₄ (mm)	15%	1.00	1.01	1.04	1.06	1.09	1.15	Lara, 2007	$y = 0,0049x^2 - 0,0049x + 1,0016$ $R^2 = 0,9959$
								Muñoz, 2013	
								Campos M., 2014	
Pendiente, I (%)	10%	1.00	1.02	1.04	1.07	1.10	-	Lara, 2007	$y = 0,0016x^2 + 0,016x + 0,9822$ $R^2 = 0,9997$
								Muñoz, 2013	
								Vargas Cuervo, 2000	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58 Factores de amenaza sísmica.

Denominación	Ponderación	Rangos y Puntajes					Referencias	Función de distribución
		r1	r2	r3	r4	r5		
Tipología de Suelo (naturaleza y Resistencia del terreno)	15%	1.00	1.05	1.08	1.11	1.15	Alguacil de la Blanca & Vidal Sánchez, 2012	$y = -0,0012x^2 + 0,0431x + 0,9585$ $R^2 = 0,9993$
							Ferrando A., 2014	
							Vidal y Mardones, 2011	
Susceptibilidad a la licuefacción de Suelos	19%	1.00	1.04	1.09	1.14	1.19	Obando T.; 2009	$y = 0,0015x^2 + 0,0384x + 0,9586$ $R^2 = 0,9992$
							Henríquez-Pantaleón, 2007	
							Zhous, 1980	
Variabilidad perfil estratigráfico	11%	1.00	1.03	1.06	1.08	1.11	Faccioli E. & Reséndiz, 1976	$y = -1E-04x^2 + 0,0288x + 0,9713$ $R^2 = 1$
							AIWWA, 1994	
							Lara Yáñez N.E., 2013	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 59 Factores de amenaza volcánica.

Denominación	Ponderación	Rangos y Puntajes						Referencias	Función de distribución
		r1	r2	r3	r4	r5	r6		
Pendiente, I (%)	16%	1.00	1.02	1.05	1.09	1.16	-	SERNAGEOMÍN, 2018	y = 0.0079x ² - 0.0079x + 1.0007 R ² = 0.9987
								ONEMI, 2016	
								Aguilera Sáez, 2016	
Naturaleza Fluvial del terreno	7%	1.00	1.03	1.04	1.06	1.07	-	SERNAGEOMÍN, 2018	y = -0.0017x ² + 0.0288x + 0.9731 R ² = 0.9994
								Sánchez González, 2011	
								Aguilera Sáez, 2016	
Cobertura del terreno	4%	1.00	1.01	1.02	1.03	1.94	-	Sánchez González, 2011	y = 0.0016x ² + 0.0017x + 0.9968 R ² = 1
								SERNAGEOMÍN, 2018	
								Aguilera Sáez, 2016	

Fuente: Elaboración propia.

Obtenida la vulnerabilidad y caracterizadas las amenazas, se calcula el riesgo funcional y el Índice de Riesgo Crítico.

$$\text{Riesgo medio total } (R_{kTi}) [\text{Daño}] = \left(\left(\frac{R_H}{N^{\circ} R_{kT}} \right) + \left(\frac{R_{RM}}{N^{\circ} R_{kT}} \right) + \left(\frac{R_{SM}}{N^{\circ} R_{kT}} \right) + \left(\frac{R_V}{N^{\circ} R_{kT}} \right) \right) \quad (53)$$

$$\text{Grado de Riesgo } (D_{Ri}) [..] = \frac{R_{kTi} [\text{Daño}]}{\sum R_{kTi} [\text{Daño}]} \quad (54)$$

$$\text{Nivel de criticidad } (L_{Cr}) [..] \begin{cases} 1. - \text{Prioritario} \\ 2. - \text{Muy alta} \\ 3. - \text{Alta} \\ 4. - \text{Normal} \end{cases}$$

$$\text{Riesgo Crítico } (R_{Ci}) [..] = \frac{R_{kTi} [\text{Daño}]}{L_{Cr}} \quad (55)$$

$$\text{Índice de Riesgo Funcional } (I_{FR}) [..] = \frac{R_{Ci} [\text{Daño}]}{\sum R_{Ci} [\text{Daño}]} \quad (56)$$

$$\text{Índice de Riesgo Crítico } (I_{RCi}) = \frac{D_{Ri} [..]}{\sum R_{Ci} [..]} \quad (57)$$

En la siguiente gráfica se representan las funciones de vulnerabilidad y los niveles de probabilidad de daño en base a la metodología FEMA-HASUS, (2004). Este análisis generado a través de dicha metodología confirma la idoneidad de la metodología desarrollada en la Tesis, al obtener unos resultados asimilables, aunque en este caso correlacionados con las amenazas específicas de cualquier zona geográfica y diferentes Sistemas de

Infraestructuras Hidráulicas Urbanas, algo de lo que adolece la metodología HAZUS y otras como CAPRA, (2010), o RISK-UE (2004), siendo todas ellas probabilísticas.

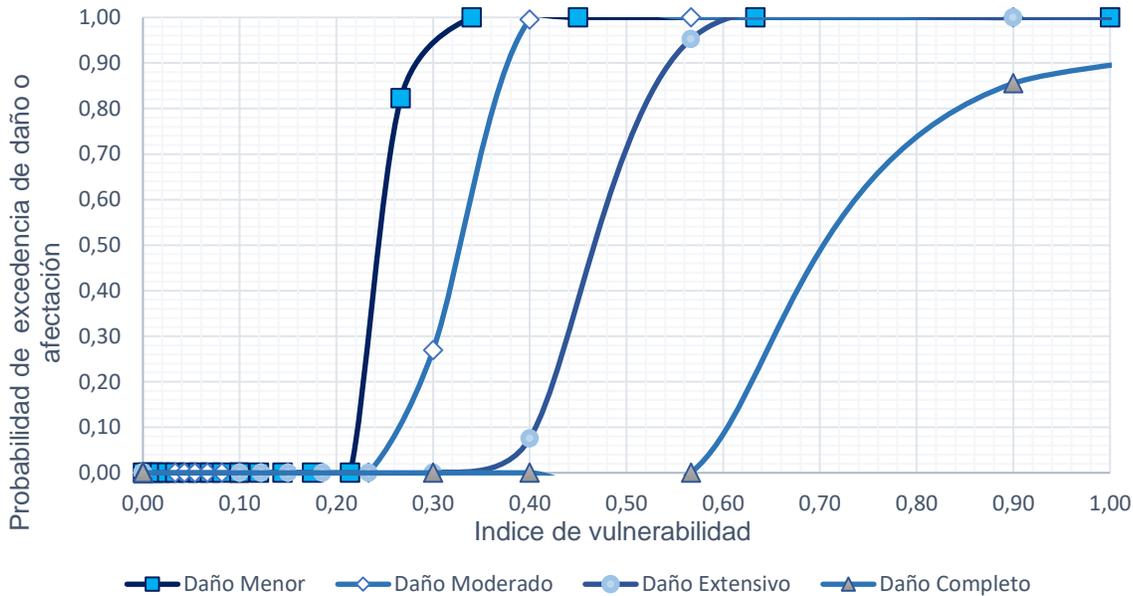


Figura 20 Funciones de daño. Elaboración propia

Los parámetros estadísticos que definen las funciones de daño son los que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 60 Parámetros estadísticos y nivel de daño.

Daño	Media μ .	Desviación típica σ .
Menor	0,19	0,24
Moderado	0,23	0,24
Extensivo	0,33	0,25
Completo	0,54	0,23

Elaboración propia.

Las funciones de daño obtenidas mediante la metodología HAZUS, se consideran específicas del Sistema, pues se han obtenido a partir de la caracterización de la Infraestructura hidráulica (rangos, valores y ponderación de indicadores) y de la microzonación de las amenazas analizadas, esta última variable según la localización de la misma.

Tabla 61 Indicador de vulnerabilidad (I_v) y probabilidad de daño.

Probabilidad daño	Indicador de Vulnerabilidad (I _v)			
	Menor	Moderado	Extensivo	Completo
0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,0500	0,01	0,00	0,00	0,00
0,1000	0,01	0,00	0,00	0,00
0,1500	0,02	0,00	0,00	0,00
0,2000	0,03	0,03	0,00	0,00
0,2500	0,03	0,04	0,00	0,00
0,3000	0,05	0,05	0,00	0,00
0,3500	0,06	0,07	0,00	0,00
0,4000	0,07	0,08	0,00	0,00
0,4500	0,08	0,10	0,10	0,00
0,5000	0,10	0,12	0,12	0,00
0,5500	0,10	0,15	0,15	0,00
0,6000	0,12	0,19	0,19	0,00
0,6500	0,14	0,23	0,23	0,00
0,7000	0,18	0,30	0,30	0,30
0,7500	0,21	0,40	0,40	0,40
0,8000	0,27	0,57	0,57	0,57
0,8500	0,34	0,90	0,90	0,90
0,9000	0,45	1,90	1,90	1,90
0,9500	0,63	10,00	10,00	10,00
1,0000	1,00	0,00	0,00	0,00

Elaboración propia.

4.4. Aplicación de la Metodología

La metodología de análisis de riesgos propuesta podría generar escenarios potenciales de afectación de la infraestructura hidráulica en base a los riesgos específicos obtenidos a partir de las amenazas específicas y la vulnerabilidad de los diferentes componentes de la infraestructura hidráulica definida por los indicadores de susceptibilidad y los indicadores de resiliencia de acuerdo con los postulados de (Cardona O.D., 2004); (Carreño M. O., 2005); (Carreño, et al., 2006); (Barbat A.H. & Pujades L, 2004); (Carreño M. O., 2007b); y otros.

Dichos escenarios se representarían en mapas probabilísticos o determinísticos según la tipología de información disponible, y para ello resulta esencial disponer de una aplicación S.I.G. (Sistema de Información Geográfica) que permita a través de una base de datos relacional, incorporar periódicamente la información física y operacional de la infraestructura hidráulica, generando su conectividad, además de la información de las amenazas específicas, factores de amenaza, caracterización geológica y geotécnica (mapas geológicos y geotécnicos, y ensayos geotécnicos específicos), basados en análisis zonales (determinísticos y probabilísticos) que permitirían relacionar dicha información, y generar así los diferentes mapas temáticos necesarios para la gestión de los riesgos hidrológicos y geológicos, según la tipología e intensidad de la amenaza, la vulnerabilidad y la criticidad de la infraestructura hidráulica específica, y la planificación de las actuaciones (Planes de Contingencia y de Gestión de Riesgos), elaboración de Planes de Inversión o establecimiento de medidas de mitigación de daños.

La aplicación de la metodología desarrollada, mediante una estructuración conveniente de la información y la generación de mapas de riesgo específico ayudarían sobremanera, en la planificación de actuaciones de incremento de la resiliencia, mitigación de daños en caso de desastres naturales, y la gestión eficiente de la infraestructura, incrementando así la sostenibilidad de esta, permitiendo un seguimiento de los indicadores representativos de la misma.

Para ello, la disponibilidad y la estructuración necesaria de la información es un de las claves más importantes que redundará en el grado de calidad del resultado final de la implantación del modelo metodológico, así como la adecuación de rangos y parámetros de variables que definen la operación de la infraestructura hidráulica urbana.

A continuación, Figura 21, se muestra un esquema general del modelo metodológico propuesto, replicable a cualquier Sistema, con las salvedades indicadas, y el desarrollo aplicativo de la metodología propuesta en la presente investigación. (Figuras 22-25).

Se adjunta síntesis del análisis metodológico desarrollado. (Figuras 26-27).

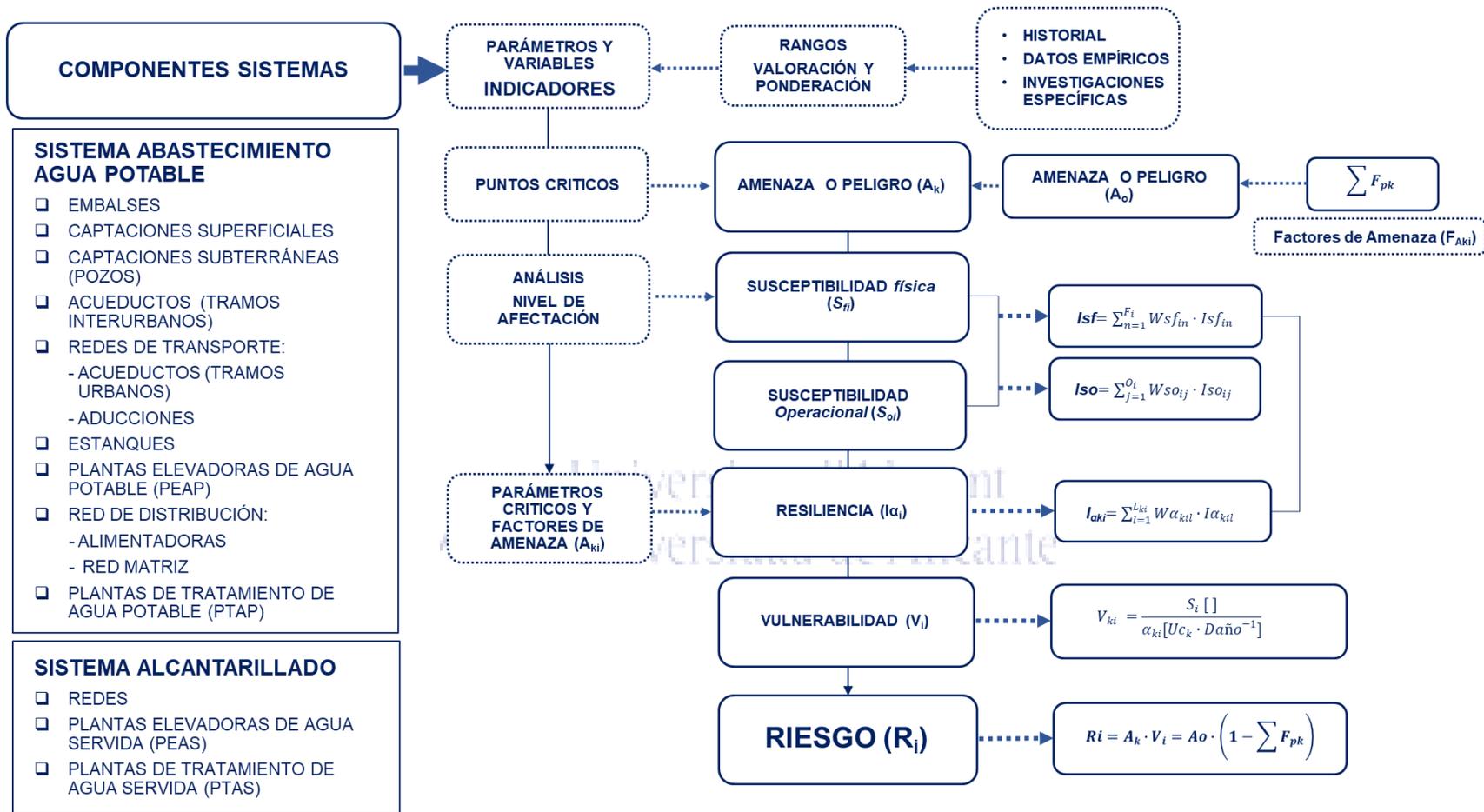


Figura 21 Esquema de aplicación metodológica. Fuente: Elaboración propia.

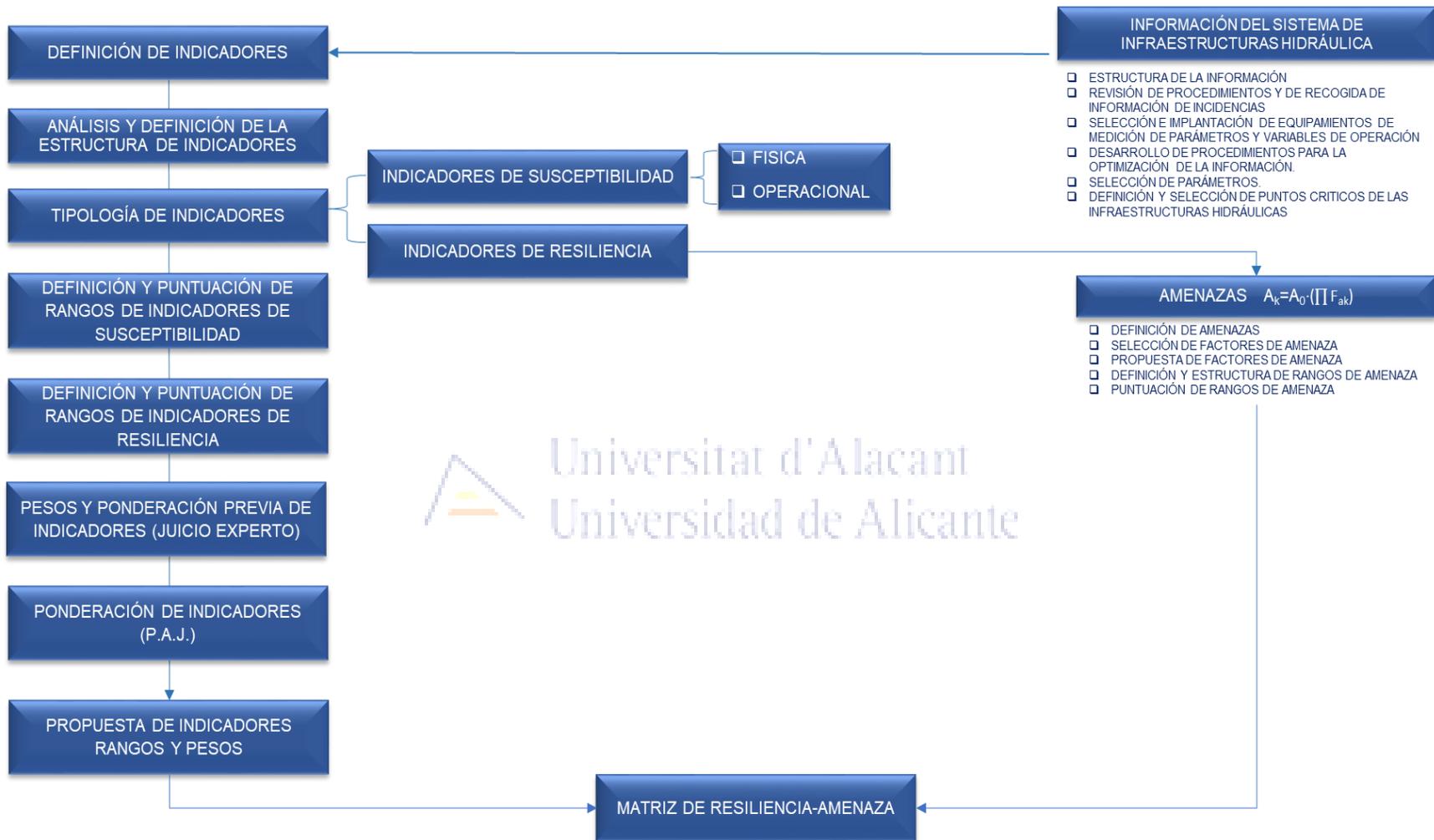


Figura 22 Desarrollo y aplicación de la Metodología Fase I. Fuente: Elaboración propia.

DESARROLLO Y APLICACIÓN METODOLÓGICA-FASE II

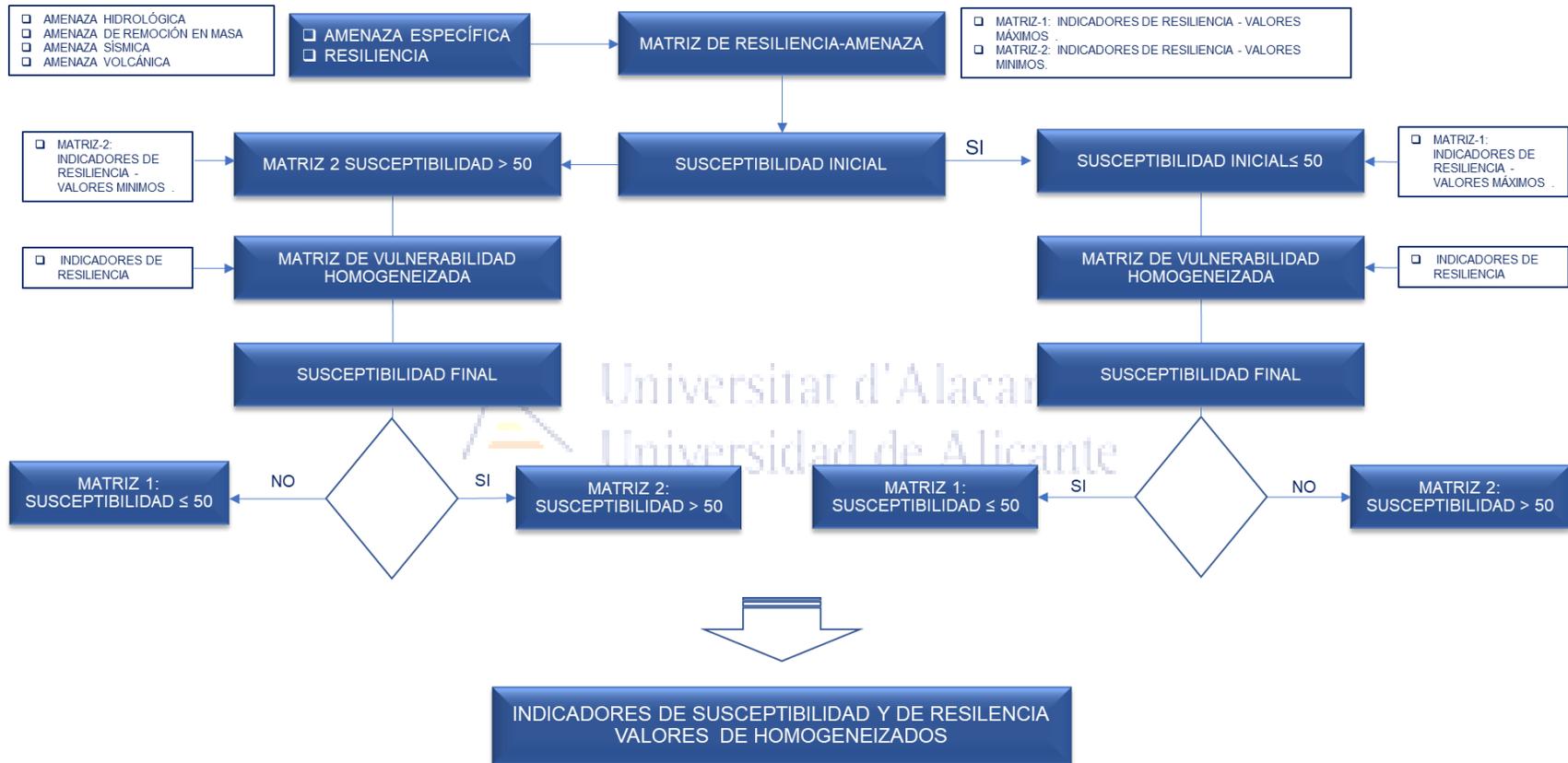


Figura 23 Desarrollo y aplicación de la Metodología Fase II. Fuente: Elaboración propia.

DESARROLLO Y APLICACIÓN METODOLÓGICA-FASE III

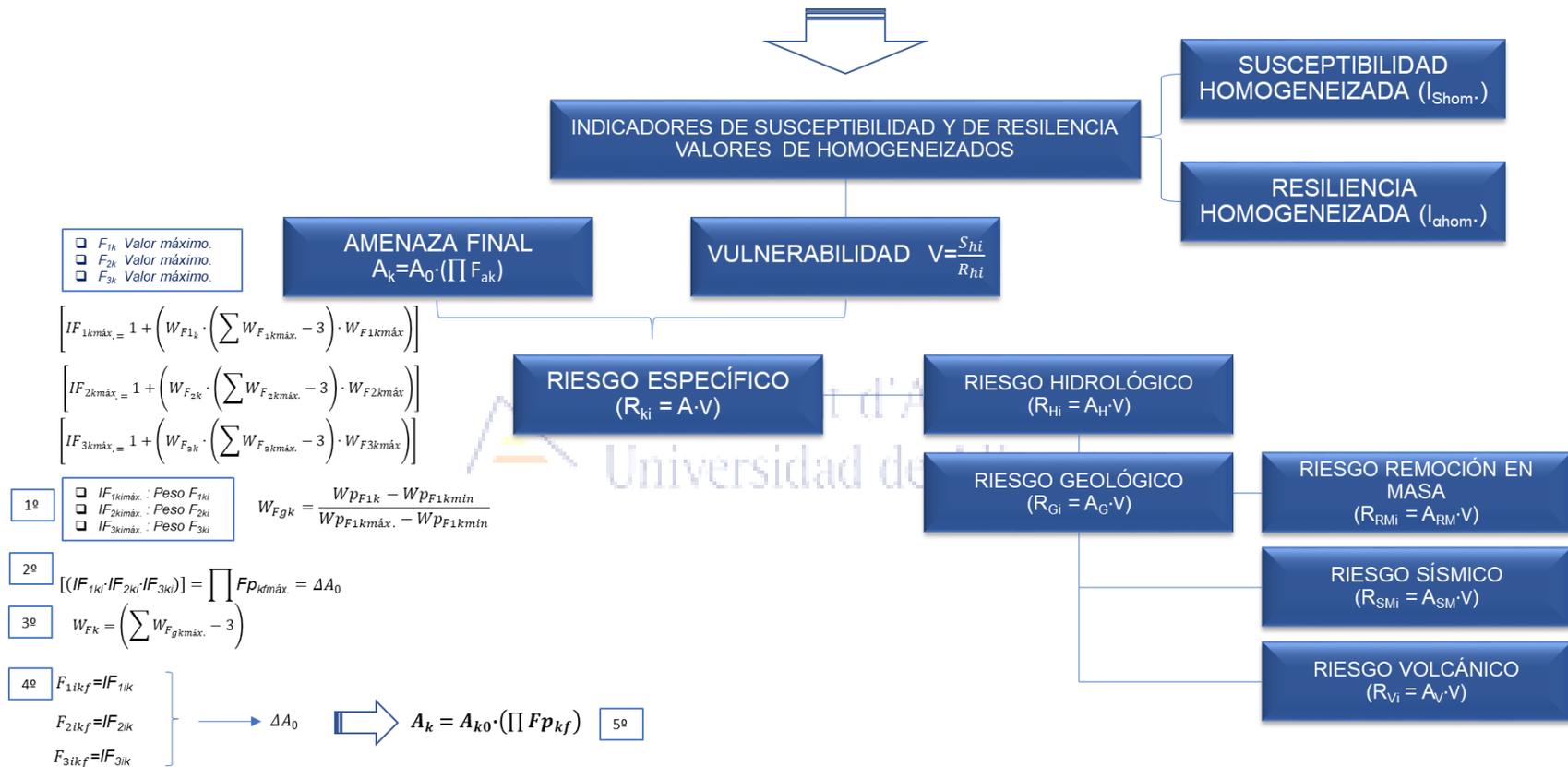


Figura 24 Desarrollo y aplicación de la Metodología Fase III. Fuente: Elaboración propia.

DESARROLLO Y APLICACIÓN METODOLÓGICA-FASE IV

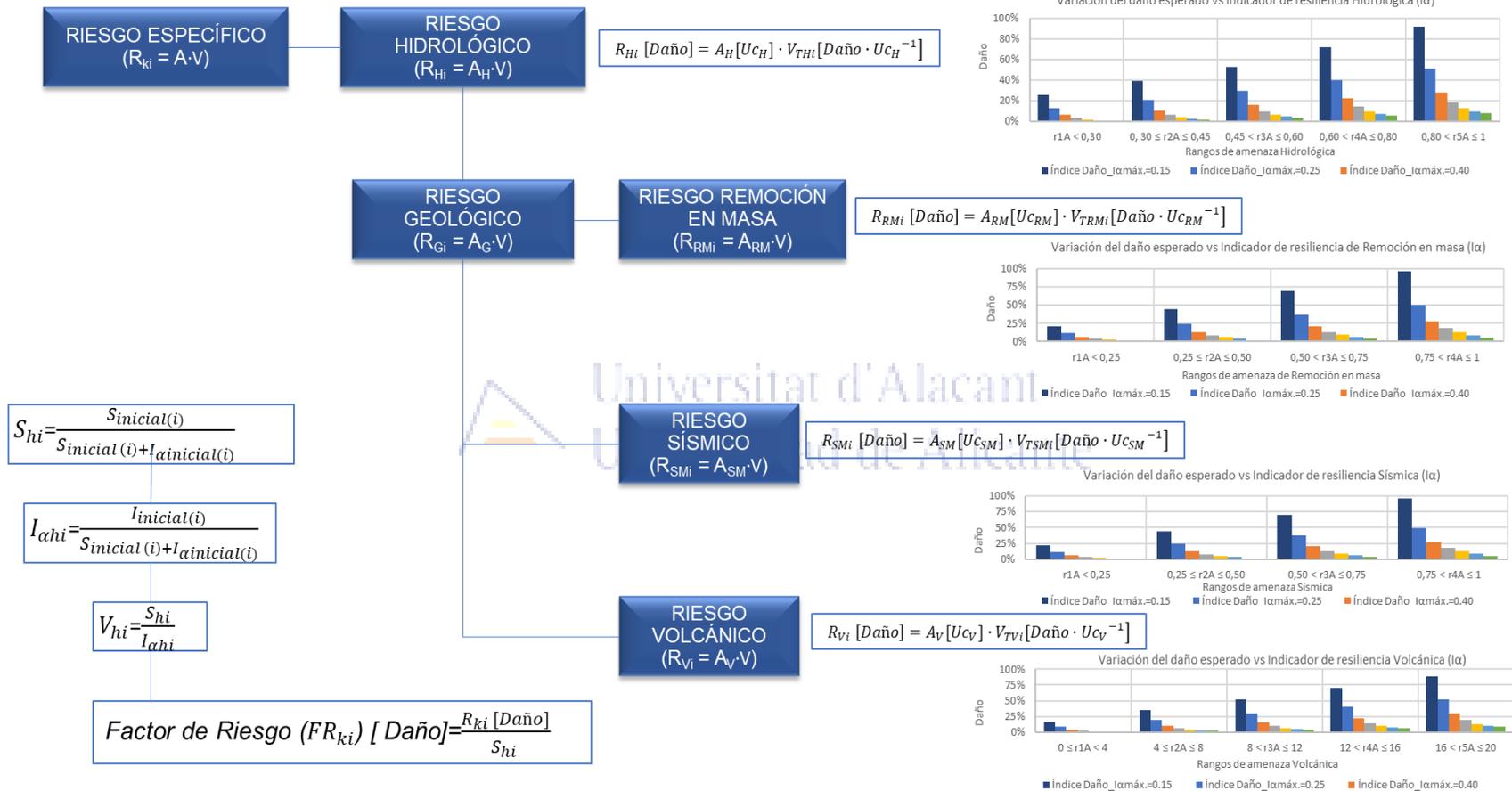


Figura 25 Desarrollo y aplicación de la metodología Fase IV. Fuente: Elaboración propia.



Figura 26 Síntesis del análisis metodológico I. Fuente: Elaboración propia.



Figura 27 Síntesis del análisis metodológico II. Fuente: Elaboración propia

4.5. Generalización y limitaciones de la metodología

La metodología de análisis de riesgos, propuesta, se desarrolla con un enfoque de aplicación general a cualquier Sistema de Infraestructuras Hidráulicas, para lo cual, mediante un análisis preliminar de la Información, se homogeniza la misma, y se estructura en base a las características físicas y operacionales de ésta.

En un segundo estadio se plantea la construcción de indicadores representativos de la Infraestructura hidráulica, priorizando sus componentes (nivel de criticidad), parametrizando variables e integrando las potenciales amenazas, previamente caracterizadas localmente.

En el caso de los abastecimientos urbanos, no hay que olvidar que los objetivos principales de la Infraestructura hidráulica, es el mantenimiento del servicio, tanto en cantidad de recurso (caudal tratado y suministrado), como de la calidad de este, manteniendo los parámetros de calidad de agua en los límites fijados por la normativa específica.

Las amenazas propuestas, que potencialmente pudiesen afectar la normal operación de la Infraestructura hidráulica, se zonifican, caracterizándolas, y seleccionando aquellos factores de amenaza que pudiesen incrementar el grado de afectación de la infraestructura, analizando la criticidad de la misma en el Sistema de Infraestructuras, como las incidencias en la operación, debido a los efectos generados por la amenaza específica, integrando dicha criticidad de cada componente de la Infraestructura, en la operación del Sistema en su conjunto, o bien Sectores hidráulicos, o zonas hidráulicas.

Otro aspecto planteado en esta metodología de análisis ha estado enfocado en la valoración de los diferentes rangos de amenaza, y la ponderación de los factores de amenaza, los cuales han sido fijados en base a los postulados y las recomendaciones de otras investigaciones revisadas y analizadas.

Como consecuencia de este análisis se han propuesto diversas funciones de comportamiento y evolución, tanto de las amenazas hidrológicas y geológicas caracterizadas, como de los factores de amenaza y de los indicadores de resiliencia, que permitiría realizar posteriores ajustes en la evolución de estos.

En relación con las limitaciones de la metodología desarrollada, cabe mencionar que la selección de las amenazas con potencial repercusión en relación con la continuidad operativa de la Infraestructura hidráulica urbana es un aspecto que necesita ser desarrollado con mayor amplitud.

Otra limitación, sería la carencia de información relevante para definir los indicadores del Sistema, y sobre todo fijar aquellos que resultan más relevantes, con relación a las características locales, y la tipología del suministro de agua potable, la diversificación de fuentes de suministro, las alternativas de suministro y el desarrollo tecnológico de aquel, que en algunos casos obliga a realizar estimaciones, basadas en la experiencia o en juicios de valor, y que solo es posible concretar analizando la evolución temporal de dichos indicadores.

Es por ello, que se desarrolla de manera auxiliar una metodología adaptada de análisis de la evolución de las diversas tipologías de indicadores que, aunque de ámbito global, con relación al Sistema de Infraestructuras, abarca todas las áreas de este, e identifica el desarrollo de la resiliencia y el grado de sostenibilidad de esta, con repercusión en la gestión de aquellas (*Metodología de Gestión de Riesgos-IGR*).

El análisis a largo plazo, y la actualización periódica de la información, así como el desarrollo de herramientas informáticas que operen en plataformas GIS, resultan claramente esencial.

El desarrollo de procedimientos operativos, que integren calidad de la operación, durabilidad de materiales prestaciones de equipamiento, sistemas de monitorización, integración de funcionalidades, y eficiencia operativa, es otra de las líneas de investigación que precisan de mayores análisis, y que, aunque de manera general se han planteado durante el desarrollo de la investigación aplicada realizada.



5. Casos de aplicación de la Metodología

Para el desarrollo de la actual propuesta metodológica, se ha considerado el estudio de la Infraestructura hidráulica de dos sistemas de Infraestructuras de Abastecimiento de agua potable y de Saneamiento (Murcia, en España, y Santiago, en Chile), que a pesar de presentar diferencias notables, tanto en su configuración física, tipología de fuentes de abastecimiento, ámbito territorial y diferencias en el grado de gestión de la misma, así como riesgos específicos de tipología y de magnitud diferente, presenta similitudes desde un enfoque holístico que integra la caracterización física y operacional de sus componentes hidráulicos, con las amenazas específicas, que comparte ciertos factores “gatillante” o desencadenantes de éstas.

En la actualidad se avanza en el desarrollo aplicativo de la metodología propuesta, y para ello se ha analizado la Infraestructura existente en ambas localizaciones. Sistemas que han servido para ajustar los indicadores, los rangos, las ponderaciones, y la caracterización de las diversas amenazas locales.

Los valores y pesos asignados a los indicadores que se emplean, se proponen en base a juicio experto, ajustados mediante el procedimiento de análisis jerárquico, según el desarrollo evolutivo de la gestión de la Infraestructura hidráulica, asignando valores umbrales máximos y mínimos y diferentes bandas de fluctuación según la criticidad estimado del indicador propuesto, siguiendo los postulados de las investigaciones de Liemberger R. (2007), y Lambert A. & Mckenzie (2002).

5.1. Infraestructura Hidráulica de la Ciudad de Santiago (Chile)

Aguas Andinas, S.A., es la empresa responsable de la gestión del ciclo integral del agua en Gran Santiago, y gran parte de la Región Metropolitana de Chile. Las fuentes de suministro de agua potable se diversifican entre captaciones superficiales que suponen el 85% de los recursos (cuencas del río Maipo prioritariamente, y del río Mapocho, en menor medida), y en un 15% de aguas subterráneas como complemento a los recursos superficiales indicados. La zona urbana denominada (Gran Santiago) se abastece prácticamente en su totalidad, de captaciones superficiales.

Los núcleos urbanos más alejados denominados “localidades”, se alimentan de manera autónoma, abasteciéndose mayoritariamente de las aportaciones subterráneas. Las principales reservas de agua en el Gran Santiago son Laguna Negra, con una capacidad de 600 millones de m^3 y el embalse El Yeso, con una capacidad de 220 millones de m^3 .

En la actualidad Aguas Andinas dispone 23 plantas de tratamiento de agua potable, entre las que destacan por importancia (capacidad y nivel de criticidad), el complejo Las Vizcachas, La Florida y en menor medida la planta San Enrique. En el año 2016, el volumen de agua medido a la salida de las plantas de agua potable fue de 809 millones de metros cúbicos. Las captaciones subterráneas son almacenadas en los estanques gracias a las plantas elevadoras de agua potable que permiten aumentar la presión del sector en caso de necesidad. La red de transporte desde las plantas de tratamiento hasta los estanques tiene una longitud total de 1.757 km, y la red de distribución, que abastece directamente a los usuarios, tiene una longitud total de 13.190 km.

El suministro de agua potable en el ámbito del Grupo Aguas presenta 4 zonas de operación: Antilco, Mapué, Mapocho y Cordillera.

Desde el punto de vista operacional, la sectorización de cada sistema de distribución se estructura en base a la tipología de alimentación, ya que la mayoría de éstos se alimentan gravitacionalmente a partir de los estanques localizados a lo largo del trazado de los acueductos o aducciones que se encuentran en su mayoría en el borde precordillerano andino (zona oriental de la ciudad de Santiago), a cota más elevada.

De esta forma, aprovechando la pendiente topográfica del terreno, se abastece desde los estanques, generalmente en dirección oriente – poniente, mediante las conducciones principales o “alimentadoras”.

Al contrario, la zona oriente de la Región Metropolitana, por su localización a cota superior en relación con los acueductos o aducciones precisa de redes impulsadas, por lo que se prevén las plantas elevadoras de agua potable.

La zona nororiente, encuadrada en la zona de cordillera, presenta una variabilidad en su desarrollo urbano y una topografía característica, por lo que el diseño de la red de distribución se caracteriza por localizarse muy próxima a los mismos centros de producción de agua potable, y por lo tanto la longitud de la red de transporte es reducida. Sin embargo, en otros casos fue precisa la instalación de plantas elevadoras de agua potable por niveles de presión, además de la construcción de estanques de presión de reducida capacidad, lo que generó la configuración de pequeños sectores de distribución adaptados a la topografía y al desarrollo urbano precordillerano.

El ámbito territorial de la Concesión del Grupo Aguas (agua potable y aguas servidas) abarca un total de 52 municipios o comunas, que se distribuyen en las cuatro zonas indicadas, y que componen los diferentes sistemas de distribución (Mapocho, Mapué, Antilco, Cordillera y Maipo).

Los más acueductos más relevantes que transportan según los tramos, agua bruta (acueducto Cordillerano de Laguna Negra) y tratada (acueducto de Laguna negra-tramo urbano, Paralelo, Tercer acueducto, Puente Alto y San Cristóbal) representan una de las infraestructuras hidráulicas más críticas en relación con el análisis de riesgos hidrológicos y geológicos.

Las aducciones, conducciones de transporte urbanas, representan otra tipología de infraestructura hidráulica crítica.

Como se aprecia en el esquema de producción y sectorización de agua potable, el suministro de agua potable en el ámbito del Grupo Aguas presenta 4 zonas de operación, y más de 165 sectores hidráulicos. La red de distribución tiene una longitud total de 13.190 km, la red de transporte 1.757 km, 326 estanques, 234 plantas elevadoras de agua potable, 45 captaciones superficiales, 536 pozos de extracción de agua, 759,70 km de acueductos, y 23 plantas de tratamiento. En la siguiente sección se caracteriza física y operacionalmente el sistema de alcantarillado.

Respecto al sistema de alcantarillado de Santiago, éste es de tipología separativa, en su mayor extensión, puesto que únicamente el núcleo urbano más antiguo del Gran Santiago, disponen de redes de alcantarillado unitarias, desde el punto de vista operacional el Sistema de alcantarillado se divide en macrocuencas, cuencas y subcuencas hidráulicas que abarcan una superficie próxima a los 720 Km². Siendo las zonas de gestión del alcantarillado, Antilco, Maipo, Mapocho, y Mapué-Cordillera.

En relación con las amenazas más representativas, con potencial afectación de la Infraestructura hidráulica, se analiza la amenaza hidrológica, y la amenaza geológica (remoción en amenaza, sísmica y volcánica).

Los eventos extremos de naturaleza hidrológica representan una componente de amenaza natural con especial incidencia en la zona precordillerana de Santiago, tanto su orografía especialmente susceptible, como por la naturaleza geológica favorable a la generación de flujos detríticos o aluviones.



Figura 28 Zonificación de la ciudad de Santiago (Chile) y zonas limítrofes. Escala 1:250.000.
Fuente: Google Earth.

La cuenca de Santiago está ocupada por la extensa hoya del río Maipo, formada por la confluencia de los ríos Yeso y Colorado, y que recibe en plena cuenca el aporte del río Mapocho. El máximo caudal se produce entre noviembre y febrero, a consecuencia de los deshielos y también como resultado de las grandes avenidas, producto de la precipitación líquida en invierno, sobre la cota de 2.000 m, en todo el sistema orográfico andino situado frente a la ciudad de Santiago.

El borde precordillerano de Santiago, caracterizado por un relieve montañoso que supera en ciertos casos los 3.000 msnm, presenta una geomorfología compleja debido al origen geológico-tectónico, presenta un potencial importante de generación de procesos geofísicos, gravitacionales e hidrológicos.

El pie de monte comprendido entre los ríos Maipo y Mapocho, en la Región Metropolitana (provincias de Santiago y Cordillera), que abarca las comunas de Lo Barnechea, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto, se caracteriza por presentar valles estrechos o quebradas, algunas de ellas con gran potencial de generación de episodios de remoción en masa combinados con otros peligros geológicos e hidrológicos. Dichas quebradas son las siguientes:

- La Quebrada de Ramón.
- La Quebrada de Macul.
- Quebrada de Ñilhue.
- Quebrada Nido de Águilas.
- Quebrada Lo Cañas.

Estos procesos, provistos de la gran energía, debido al importante volumen de detritos y el relieve de las zonas elevadas de las microcuencas hidrológicas, se constituyen en una importante amenaza para las infraestructuras hidráulicas, tanto desde el punto de vista físico como operacional, sobre todo por la generación de importantes niveles de turbiedad, que provoca la parada parcial o total de las Plantas de tratamiento de agua.

Según la información recopilada, de diversas investigaciones realizadas en las diferentes universidades de Santiago, revelan el riesgo potencial de eventos sísmicos de tipo intraplaca generado por fallas corticales y dada la confluencia con otros factores de riesgo de origen hidrológico se considera de especial susceptibilidad en relación, a las infraestructuras hidráulicas urbanas, más aún cuando una de las principales fallas, la de San Ramón, se localiza en el entorno urbano, siendo ésta, capaz de generar sismos superficiales de intensidad 7.5 (IMM). Es de resaltar, que gran número de las principales infraestructuras

de abastecimiento de agua se localizan en la zona próxima a la coitada falla, y en otros casos las fallas existentes inciden en infraestructuras hidráulicas críticas.

En relación con la amenaza volcánica, hay que considerar que el fondo de la cuenca de Santiago, al menos los estratos que constituyen los 120 m iniciales de profundidad se componen de sedimentos aluvio-fluviales. Dichos sedimentos, originados por los rellenos de los ríos Maipo y Mapocho; sedimentos fluviales de los Esteros Lampa, Colina y Angostura, y depósitos de cenizas, provenientes del Complejo Eruptivo Caldera Diamante- Volcán Maipo (Volcán Maipo), actualmente activo y que ha tenido signos de actividad sísmica y gasificación en los últimos 10 mil años, aunque no erupciones.

Las erupciones generadas por el volcán Maipo, localizado a 5.323 m.s.n.m., que afectaron a la cuenca de Santiago, hace 450 mil años, cubrió con su ceniza gran parte del hemisferio sur. En la actualidad en el caso de acontecer, habría un riesgo extremo para toda la Región Metropolitana, ya que sus cenizas, lavas y piroclastos se expandirían por toda la ciudad de Santiago.

Además del Maipo, los otros volcanes activos serían el Tupungatito, y el San José, aunque sin erupciones, en los últimos 10.000 años.

Una posible erupción del volcán San José tendría efectos en primer lugar en las zonas de Los Queltehues, Romeral, San Gabriel, San Alfonso, Melocotón, San José y Los Maitenes, y posteriormente en Santiago, a través del traslado de productos volcánicos (cenizas, coladas de lodo, y lahares) a través de cursos fluviales.

Debido a la ubicación de las infraestructuras críticas de abastecimiento de agua potable localizadas en el ámbito zonal de potencial afectación, el mayor peligro estibaría en la formación de lahares y movimientos sísmicos que podrían afectar las captaciones de agua localizadas en el cauce del Río Maipo, el embalse El Yeso y el acueducto de Laguna Negra-Tramo Cordillerano), así como la caída y flujo de piroclastos como factores generadores de otros eventos catastróficos (desbordamientos, rotura de equipamientos y estructuras, y contaminación del agua).

Se ha analizado de manera general la Infraestructura hidráulica de la Ciudad de Santiago en el ámbito competencial indicado, y como ejemplo de caso de aplicación de la metodología se ha considerado incluir en la presente investigación uno de los componentes esenciales de la Infraestructura hidráulica urbana gestionada por Aguas Andinas:

- Red de distribución de abastecimiento de agua potable.

No obstante, el desarrollo de la investigación se ha realizado igualmente a la totalidad de los componentes esenciales del Sistema.

A continuación, se resume el análisis efectuado de la red de distribución de agua potable, en base a la información disponible y la estimada en su caso, según los postulados de la investigación realizada.

□ RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

La red de distribución de abastecimiento de agua potable a la ciudad de Santiago presenta grandes diferencias según la zona o sector hidráulico correspondiente, así como la gestión operacional de la misma. Sirva este análisis para verificar y demostrar la aplicación de la metodología desarrollada, aunque de manera más detallada se recomienda su análisis por sectores o subsectores hidráulicos, ya que el grado de homogeneidad de condiciones sería mayor, por lo que sus resultados presentarían menor incertidumbre. Por otra parte, la localización de la red de transporte o abastecimiento “en alta”, condiciona su operación, la continuidad del servicio, y la necesidad de alternativas de suministro.

Como datos esenciales para efectuar el análisis de susceptibilidad (Anexo 7 “Indicadores de Susceptibilidad”) de la red de distribución de agua potable serían necesarios los siguientes:

- Antigüedad del material de la tubería, A (años).
- Naturaleza del material, M.
- Número de conexiones o uniones flexibles (permiten desplazamientos axiales o de cizalla limitados).

- Número total de válvulas de corte de la red de distribución.
- Número de roturas o fallas no provocadas o “accidentales” anuales.
- Longitud de la red de distribución (km).
- Grado de mantenimiento (desde I hasta VI), según se adjunta en el anexo 4 “Tipología de mantenimiento de redes”.
- Número de válvulas de corte de la red de distribución.
- Número de acometidas domiciliarias de abastecimiento o arranques a la red.

El análisis realizado inicialmente presentaba un mayor número de indicadores que los seleccionados finalmente, ya que, tras un análisis experto y la aplicación del procedimiento de análisis jerárquico, permitió reducir su número sin disminuir por ello su grado de aproximación, facilitando así su aplicación por la disponibilidad de información limitado que existe en algunos casos.

Con relación a la obtención de los indicadores de resiliencia, se desarrollaron por cada tipología según amenaza específica, tres (3) indicadores representativos de la infraestructura hidráulica, tal y como se adjunta en el anexo 8 “Indicadores de resiliencia”.

La definición de las amenazas y el rango de aplicación de esta en base al parámetro crítico que se establece en cada caso (amenaza umbral o inicial), así como los factores de amenaza considerados permite la obtención de la amenaza final o “amenaza corregida”, que se empleará para la obtención de los indicadores de resiliencia y de susceptibilidad homogeneizados.

La obtención del riesgo específico (Rk) a partir de la amenaza final y de la vulnerabilidad (Sh./ah.) como producto de ambos términos, es decir,



$$R_{ki} [\text{Daño}] = A_k [U_{Ck}] \cdot V_{ki} [\text{Daño} \cdot U_{Ck}^{-1}]$$

- Indicadores de Susceptibilidad

Indicadores de Susceptibilidad física (I_{sf})				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
I_{sfRD1}	$r_4=0.50$	0,50	0,12	0,06
I_{sfRD2}	$r_2=0.30$	0,80	0,18	0,14
I_{sfRD3}	$r_2=0.25$	0,80	0,15	0,12
<i>Total</i>				0,32

Indicadores de Susceptibilidad operacional (I_{so})				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
I_{soRD1}	$r_5=0.18$	0,50	0,19	0,10
I_{soRD2}	Grado III	0,60	0,19	0,11
I_{soRD3}	$r_5=0.06$	0,50	0,16	0,08
<i>Total</i>				0,29

- **Indicadores de Resiliencia**

Resiliencia hidrológica ($I_{\alpha H}$)				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
$I_{\alpha HRD1}$	$r_2=0.10$	0,20	0,35	0,07
$I_{\alpha HRD2}$	$r_2=0.20$	0,25	0,40	0,10
$I_{\alpha HRD3}$	$r_9=0.90$	0,25	0,35	0,09
<i>Total</i>				0,26

Resiliencia de Remoción en masa ($I_{\alpha RM}$)				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
$I_{\alpha RMRD1}$	$r_6=0.60$	0,55	0,40	0,22
$I_{\alpha RMRD2}$	$r_5=0.50$	0,65	0,20	0,13
$I_{\alpha RMRD3}$	$r_8=0.75$	0,35	0,40	0,14
<i>Total</i>				0,49

Resiliencia Sísmica ($I_{\alpha SM}$)				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
$I_{\alpha SMRD1}$	$r_9=0.90$	0,25	0,30	0,08
$I_{\alpha SMRD2}$	$r_6=0.60$	0,55	0,35	0,19
$I_{\alpha SMRD3}$	$r_8=0.80$	0,35	0,35	0,12
<i>Total</i>				0,39

Resiliencia de Volcánica ($I_{\alpha V}$)				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
$I_{\alpha VRD1}$	$r_{10}=0.95$	0,15	0,30	0,05
$I_{\alpha VRD2}$	$r_{10}=1.0$	0,15	0,40	0,06
$I_{\alpha VRD3}$	$r_9=0.90$	0,25	0,30	0,08
<i>Total</i>				0,18

Seguidamente, se resumen las diferentes tipologías de indicadores.

Resumen Indicadores	
Susceptibilidad física	0,32
Susceptibilidad operacional	0,29
Resiliencia hidrológica	0,26
Resiliencia de Remoción en masa	0,49
Resiliencia Sísmica	0,39
Resiliencia Volcánica	0,18

Tras la obtención de los indicadores iniciales se caracterizan las amenazas específicas y los factores de amenaza convenientes, según la zona de localización de la Infraestructura hidráulica.

- **Amenazas específicas.**

Las amenazas consideradas en este análisis, se circunscriben a la amenaza hidrológica, remoción en masa, sísmica y volcánica, siendo los factores de amenaza los indicados a continuación con el grado de afectación correspondiente, según la Tabla 14 para la amenaza hidrológica, la Tabla 18 para la amenaza de remoción en masa, la Tabla 20 para la amenaza sísmica, y la Tabla 23 para la amenaza volcánica.

Amenaza Hidrológica ($A_H=A_{H0}*\Pi F_{pH}$)			
Amenaza (A_{H0}). Parámetro crítico (P_{pH})	Factores de amenaza (ΠF_{pH})	Amenaza Hidrológica (A_H)	Incremento
0.45	1.13	0.51	12.60%

Amenaza hidrológica (A_H)	0,51
Amenaza hidrológica umbral (A_{H0})	0,45
Factores de Amenaza hidrológica (F_{pH})	1,13
Nivel freático (F)	1,047
Permeabilidad del terreno (k)	1,038
Coef. de escorrentía (Ce)	1,036

Amenaza Remoción en masa ($A_{RM}=A_{RM0}*\Pi F_{pRM}$)			
Parámetro crítico (P_{pRM})	Factores de amenaza (ΠF_{pRM})	Amenaza Remoción en masa (A_{RM})	Incremento
0.60	1.22	0.73	21.91%

Amenaza de Remoción en masa (A_{RM})	0,73
Amenaza de Remoción en masa umbral (A_{RM0})	0,60
Factores de Amenaza de Remoción en masa (F_{pRM})	1,22
Velocidad de deslizamiento (Vd)	1,06
Intensidad de Precipitación (I_{24})	1,08
Pendiente (I)	1,06

Amenaza Sísmica ($A_{SM}=A_{SM0}*\Pi F_{pSM}$)			
Parámetro crítico (P_{pSM})	Factores de amenaza (ΠF_{pSM})	Amenaza Sísmica (A_{SM})	Incremento
0.60	1.29	0.78	29.25%

Amenaza Sísmica (A_{SM})	0,84
Amenaza Sísmica umbral (A_{SM0})	0,60
Factores de Amenaza Sísmica (F_{pSM})	1,40
Resistencia del terreno	1,12
Potencial licuefacción de los suelos	1,13
Variabilidad del perfil estratigráfico	1,11

Amenaza Volcánica ($A_V=A_{V0}*\Pi F_{pV}$)			
Amenaza (A_{V0}). Parámetro crítico (P_{pV})	Factores de amenaza (ΠF_{pV})	Amenaza Volcánica (A_V)	Incremento
0.25	1.07	0.27	7.10%

Amenaza Volcánica (A_V)	0,27
Amenaza Volcánica umbral (A_{SM0})	0,25
Factores de Amenaza Volcánica (F_{pSM})	1,07
Pendiente topográfica	1,03
Naturaleza fluvial del terreno	1,02
Cobertura vegetal del terreno	1,02

Tipo de Riesgo específico $R=A_k*(S/\alpha)$	Amenaza (A_k)	Susceptibilidad (S)	Resiliencia normalizada (α)
Hidrológico (R_H)	0,51	0,61	0,30
Remoción en masa (R_{RM})	0,73	0,61	0,36
Sísmico (R_{SM})	0,84	0,61	0,28
Volcánico (R_V)	0,27	0,61	0,22

Mediante el empleo de la Tabla 55 que se muestra a continuación, se obtienen los parámetros homogeneizados de la Susceptibilidad (S) y de la Resiliencia (α).

		Susceptibilidad																				
		0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
Resiliencia	1.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10
	0.95	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11
	0.90	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11
	0.85	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12
	0.80	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13
	0.75	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.13
	0.70	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14
	0.65	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15
	0.60	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17
	0.55	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15	0.16	0.17	0.18
	0.50	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20
	0.45	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22
	0.40	0.00	0.01	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.25
	0.35	0.00	0.01	0.03	0.04	0.06	0.07	0.09	0.10	0.11	0.13	0.14	0.16	0.17	0.18	0.20	0.21	0.23	0.24	0.26	0.27	0.29
	0.30	0.00	0.02	0.03	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.18	0.20	0.22	0.23	0.25	0.27	0.28	0.30	0.32	0.33
	0.25	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40
	0.20	0.00	0.03	0.05	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.28	0.30	0.33	0.35	0.38	0.40	0.43	0.45	0.48	0.50
	0.15	0.00	0.03	0.07	0.10	0.13	0.17	0.20	0.23	0.27	0.30	0.33	0.37	0.40	0.43	0.47	0.50	0.53	0.57	0.60	0.63	0.67
	0.10	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
	0.05	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
0.01	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	

Obtenida la vulnerabilidad con los valores homogeneizados, bien directamente o interpolando en su caso, se opera obteniendo el riesgo específico y el factor de riesgo específico unitario.

Susceptibilidad homogeneizada (Sh)	Resiliencia homogeneizada (ah)	Vulnerabilidad (V)	Riesgo específico (R _k)	Factor de riesgo específico unitario (FR _k). [Daño/U _{ck}]
0,67	0,31	0,22	0,11	0,16
0,63	0,36	0,17	0,13	0,20
0,68	0,29	0,24	0,20	0,29
0,73	0,23	0,32	0,09	0,12

5.2. Infraestructura Hidráulica Urbana de la Ciudad de Murcia (España)

Aguas de Murcia, empresa mixta desde 1989, gestiona el ciclo integral del agua en la ciudad de Murcia. Cuenta con un número clientes cercanos a los 176.000, en una población total de 445.000 habitantes.

Dada, las características climatológicas de la zona que abastece, donde la precipitación anual es inferior a los 350 mm, se puede clasificar como semiárida, lo que añadido al déficit hídrico estructural. Las precipitaciones son escasas, irregulares y con episodios intensos, lo que genera no pocas veces el colapso de las infraestructuras hidráulicas sobre todo en zonas urbanas de escasa capacidad de infiltración y de morfología llana.

El término municipal de Murcia consta de 52 pedanías diseminadas en un radio máximo de 40 km, y una superficie total de 890 km².

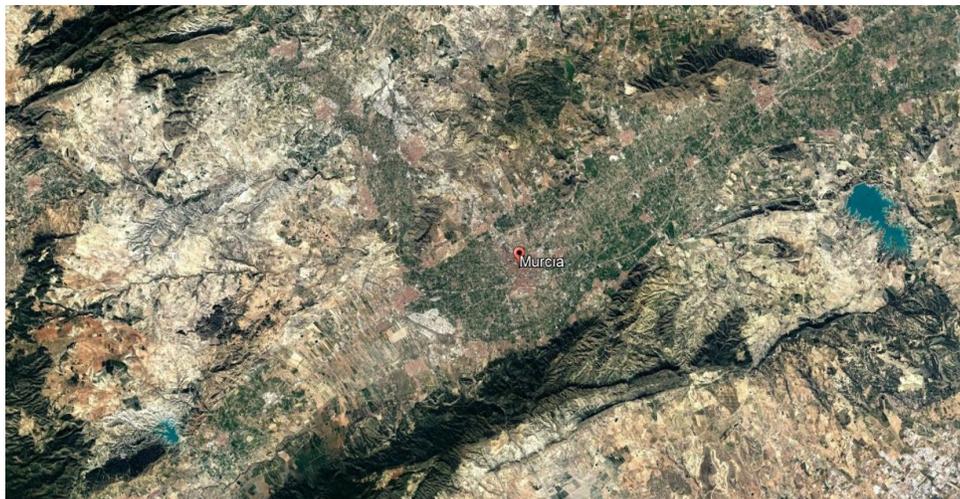


Figura 29. Imagen de la Ciudad de Murcia, y zonas limítrofes. Fuente: Google Earth.

La infraestructura hidráulica de la ciudad de Murcia debe garantizar el suministro de agua a la población, así como el tratamiento de las aguas residuales, y la evacuación de las aguas de escorrentía, mitigando el posible impacto negativo sobre el medio ambiente.

Las fuentes de suministro de agua potable a la población presentan una diversificación necesaria dado el déficit hídrico de dicha zona, y corresponden en primer lugar, al Canal del Post- Trasvase Tajo-Segura, Plantas desalinizadoras, acuíferos subterráneos, y el río Segura.

EMUASA, dispone además de una Estación de Tratamiento de agua potable "Contraparada", localizada en la pedanía de Javalí Viejo, muy próxima a la capital con una capacidad máxima de tratamiento de 25.000 m³/día, y un embalse regulador, de almacenamiento de 175.000 m³ de capacidad total. Dispone además de un sistema de desinfección adicional mediante ozono, de cloro gas con sistemas de control de toxicidad. Cuenta con una planta de recuperación energética y la gestión informatizada de los procesos de la instalación. El proceso de filtración se realiza a través de filtros de carbón activo, lo que mejora las propiedades organolépticas del agua (sabor y salubridad).

La infraestructura hidráulica de abastecimiento consta de una red de distribución de 2112 km de longitud y aproximadamente 1600 km de red de saneamiento.

La red de alcantarillado dispone además de más de 49.000 pozos de registro o arquetas de inspección, que con los más de 40.000 elementos de captación de aguas lluvias (imbornales o desagües) permiten la realización del mantenimiento y la inspección de esta Infraestructura hidráulica.

A lo largo de la red de abastecimiento dispone de 22 depósitos de almacenamiento, lo que le proporciona una garantía de reserva de 92.063 m³, que le permite un margen razonable ante cualquier eventualidad.

La red de estaciones de telecontrol le confiere además una garantía adicional de medición en continuo de los parámetros de calidad del agua. Debido a las características orográficas de la zona, se dispone de 41 estaciones de bombeo (elevación o impulsión) de agua potable, y 188 estaciones de bombeo de aguas residuales, hecho éste que le confiere una compleja gestión del sistema, y un grado de susceptibilidad que justifica la implantación de los máximos estándares en la gestión del recurso.

La red de drenaje, al tratarse de un sistema unitario, comparte su funcionalidad a través de diversos tanques de tormentas que permiten retener los primeros caudales de lluvia, y bajar el grado de contaminación inicial del agua pluvial (first flush).

Como se ha indicado la red de saneamiento es por gravedad, aunque dispone de un gran número de elevaciones e impulsiones, como ya se ha indicado. Así mismo, dispone de una red saneamiento de vacío de una longitud de 16 km, que mediante estaciones de bobeo generan el vacío necesario para evacuar las aguas residuales generadas en diversas localizaciones de la huerta, donde el gran número de canalizaciones de riesgo obstaculizan la evacuación de las mismas, y los caminos angostos dificultan la realización de las infraestructuras hidráulicas necesarias, aminorando el impacto sobre este entorno de gran valor paisajístico, histórico y patrimonial.

En relación con la infraestructura de depuración, ésta consta de 12 estaciones ubicadas estratégicamente, en toda el área de gestión, con una capacidad máxima de 39.460.000 m³/año.

Para el mantenimiento de zonas verdes, cuenta con una red de riego de más de 18 km de longitud, y más de 50 sondeos.

El rendimiento técnico de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Murcia es de los más altos de España superando el 87%, lo que le confiere una eficiencia hidráulica relevante en los 135 sectores hidráulicos en que se divide el territorio gestionado.

El consumo de agua potable por persona y día igualmente es de los más bajos de España, dada la concienciación de los ciudadanos, y las especiales características del territorio, situándose en 116 l/hab./día.

En relación a las amenazas más representativas que podrían afectar la integridad de la operación de la Infraestructura hidráulica urbana en la ciudad de Murcia, estarían la amenaza hidrológica, que representa el peligro de mayor recurrencia, sobre todo las inundaciones localizadas, y crecidas de cauces (ramblas) lo que genera eventuales asentamientos del terreno por los efectos de las escorrentías con flujo de detritos en zonas de escasa vegetación, así como afectación a la calidad del agua en tramos de captaciones superficiales, e infiltraciones en la red de canalizaciones de transporte y acueductos, y en menor medida la amenaza sísmica que aunque de menos frecuencia y mediana intensidad, podría incidir sobremanera en la generación de daños en la Infraestructura hidráulica, dadas la tipología de sismos generados en la zona, caracterizados por su superficialidad dada su escasa profundidad, direccionalidad de las fallas con incidencia en núcleos urbanos, y la tipología de terrenos, de escasa cohesión (suelos blandos), e impermeables en su mayor parte, susceptibles a la humedad. Tal es el caso de los últimos episodios sísmicos acaecidos en la zona, como es el caso del terremoto de Lorca, en 2011, con una intensidad (IMM) de 5,4, ocasionó numerosos daños en las Infraestructuras viarias, hidráulicas, edificación,Las fallas presentes en el entorno de la ciudad de Murcia, como la falla de Carrascoy (FCA) y la falla de Alhama (FAM) que son capaces de generar terremotos de intensidad superior a 7 (IMM).

Como ejemplo de caso de aplicación de la metodología propuesta se ha considerado incluir en la presente investigación la red de distribución de agua potable, como componente más representativo de la Infraestructura hidráulica urbana gestionada por Aguas de Murcia (EMUASA), aunque se hayan analizado también los demás componentes básicos del Sistema de Infraestructuras en esta investigación:

- Red de distribución de abastecimiento de agua potable.

A continuación, se resume el análisis efectuado en base a la información disponible y la estimada en su caso según los postulados de la investigación realizada.

□ RED DE DISTRIBUCIÓN DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Como ya se ha indicado anteriormente, en el caso del análisis de aplicación metodológica de Santiago de Chile, es necesario la disponibilidad de un mínimo de datos para definir los indicadores seleccionados como representativos de la Infraestructura a analizar, en este caso la red de distribución de abastecimiento.

En este caso de aplicación de la metodología a la Infraestructura hidráulica de la ciudad de Murcia se consideran representativas las amenazas, hidrológica, de remoción en masa, y sísmica, en diferente grado y rango, después del análisis previo realizado. Con respecto a los factores de amenaza, se incluyen los mismos que los contemplados para el anterior caso, con especial incidencia en la tipología de suelos, ya que éste genera un efecto “gatillante” para las diversas amenazas seleccionadas.

- **Indicadores de Susceptibilidad**

Indicadores de Susceptibilidad física (I_{sf})				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
I_{sfRD1}	$r_3=0.30$	0,30	0,12	0,04
I_{sfRD2}	$r_2=0.025$	0,80	0,18	0,14
I_{sfRD3}	$r_2=0.21$	0,80	0,15	0,12
<i>Total</i>				0,29

Indicadores de Susceptibilidad operacional (I_{so})				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
I_{soRD1}	$r_6=0.095$	0,40	0,19	0,08
I_{soRD2}	Grado IV	0,40	0,19	0,08
I_{soRD3}	$r_5=0.056$	0,50	0,16	0,08
<i>Total</i>				0,23

- **Indicadores de Resiliencia**

Resiliencia hidrológica ($I_{\alpha H}$)				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
$I_{\alpha HRD1}$	$r_3=0.13$	0,30	0,35	0,11
$I_{\alpha HRD2}$	$r_4=0.40$	0,45	0,40	0,18
$I_{\alpha HRD3}$	$r_8=0.80$	0,35	0,35	0,12
<i>Total</i>				0,41

Resiliencia de Remoción en masa ($I_{\alpha RM}$)				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
$I_{\alpha RMRD1}$	$r_4=0.40$	0,75	0,40	0,30
$I_{\alpha RMRD2}$	$r_6=0.60$	0,55	0,20	0,11
$I_{\alpha RMRD3}$	$r_9=0.85$	0,25	0,40	0,10
<i>Total</i>				0,51

Resiliencia Sísmica ($I_{\alpha SM}$)				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
$I_{\alpha SMRD1}$	$r_9=0.90$	0,25	0,30	0,08
$I_{\alpha SMRD2}$	$r_6=0.60$	0,55	0,35	0,19
$I_{\alpha SMRD3}$	$r_8=0.80$	0,35	0,35	0,12
<i>Total</i>				0,39

Resiliencia de Volcánica ($I_{\alpha V}$)				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
$I_{\alpha SMRD1}$	$r_6=0.55$	0,55	0,30	0,17
$I_{\alpha SMRD2}$	$r_8=0.75$	0,35	0,35	0,12
$I_{\alpha SMRD3}$	$r_5=0.45$	0,35	0,35	0,12
<i>Total</i>				0,41

Seguidamente, se resumen las diferentes tipologías de indicadores.

Resumen Indicadores	
Susceptibilidad física	0,29
Susceptibilidad operacional	0,23
Resiliencia hidrológica	0,41
Resiliencia de Remoción en masa	0,51
Resiliencia Sísmica	0,41

En el caso de Murcia, no se contempla la amenaza volcánica, por ser muy baja o inexistente.

Tras la obtención de los indicadores iniciales se caracterizan las amenazas específicas y los factores de amenaza convenientes, según la zona de localización de la Infraestructura hidráulica.

- **Amenazas específicas.**

En este caso, las amenazas consideradas, se circunscriben a la amenaza hidrológica, remoción en masa, y sísmica, siendo los factores de amenaza los indicados a continuación con el grado de afectación correspondiente, según la Tabla 14 para la amenaza hidrológica, la Tabla 18 para la amenaza de remoción en masa, y la Tabla 20 para la amenaza sísmica, ya que la amenaza volcánica en esta zona es nula o irrelevante.

Amenaza Hidrológica ($A_H=A_{H0}*\Pi F_{pH}$)			
Amenaza (A_{H0}). Parámetro crítico (P_{pH})	Factores de amenaza (ΠF_{pH})	Amenaza Hidrológica (A_H)	Incremento
0.45	1.13	0.51	12.60%

Amenaza hidrológica (A_H)	0,51
Amenaza hidrológica umbral (A_{H0})	0,45
Factores de Amenaza hidrológica (F_{pH})	1,13
Nivel freático (F)	1,047
Permeabilidad del terreno (k)	1,038
Coef. de escorrentía (Ce)	1,036

Amenaza Remoción en masa ($A_{RM}=A_{RM0}*\Pi F_{pRM}$)			
Parámetro crítico (P_{pRM})	Factores de amenaza (ΠF_{pRM})	Amenaza Remoción en masa (A_{RM})	Incremento
0.20	1.07	0.21	6.98%

Amenaza de Remoción en masa (A_{RM})	0,21
Amenaza de Remoción en masa umbral (A_{RM0})	0,20
Factores de Amenaza de Remoción en masa (F_{pRM})	1,07
Velocidad de deslizamiento (Vd)	1,02
Intensidad de Precipitación (I_{24})	1,03
Pendiente (l)	1,02

Amenaza Sísmica ($A_{SM}=A_{SM0}*\Pi F_{pSM}$)			
Parámetro crítico (P_{pSM})	Factores de amenaza (ΠF_{pSM})	Amenaza Sísmica (A_{SM})	Incremento
0.20	1.40	0.28	40.00%

Amenaza Sísmica (A_{SM})	0,28
Amenaza Sísmica umbral (A_{SM0})	0,20
Factores de Amenaza Sísmica (F_{pSM})	1,40
Resistencia del terreno	1,12
Potencial licuefacción de los suelos	1,13
Variabilidad del perfil estratigráfico	1,11

Tipo de Riesgo específico $R=A_k*(S/\alpha)$	Amenaza (A_k)	Susceptibilidad (S)	Resiliencia normalizada (α)
Hidrológico (R_H)	0,51	0,53	0,40
Remoción en masa (R_{RM})	0,21	0,53	0,49
Sísmico (R_{SM})	0,28	0,53	0,49
Hidrológico (R_H)	0,51	0,53	0,40

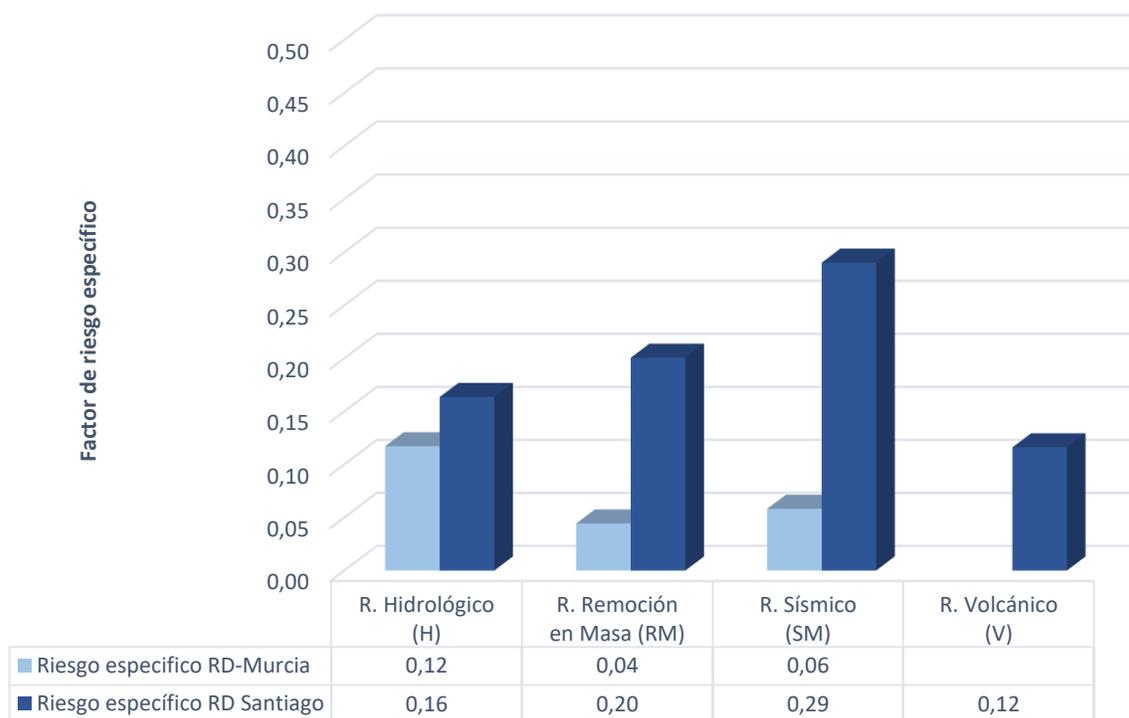
Mediante el empleo de la Tabla 55 obtenemos los parámetros homogeneizados de la Susceptibilidad (S) y de la Resiliencia (α), así como la vulnerabilidad correspondiente, interpolando en su caso para valores intermedios de la susceptibilidad y de la resiliencia.

Susceptibilidad homogeneizada (S_h)	Resiliencia homogeneizada (α_h)	Vulnerabilidad (V)	Riesgo específico (R_k)	Factor de riesgo específico unitario (FRk). [Daño/ U_{ck}]
0,57	0,43	0,13	0,07	0,12
0,52	0,48	0,11	0,02	0,04
0,52	0,48	0,11	0,03	0,06

Comparativamente, los resultados obtenidos, en ambos Sistemas de Infraestructura hidráulica, en relación con la red de distribución de agua potable, hacen presagiar que la metodología propuesta, sería aplicable a cualquier sistema de infraestructuras siguiendo el desarrollo de esta, y el análisis previo de la misma y la caracterización holística de las amenazas, vinculadas a la misma.

A continuación, se adjunta una gráfica con los resultados del riesgo específico resultante en ambos sistemas, para la red de distribución.

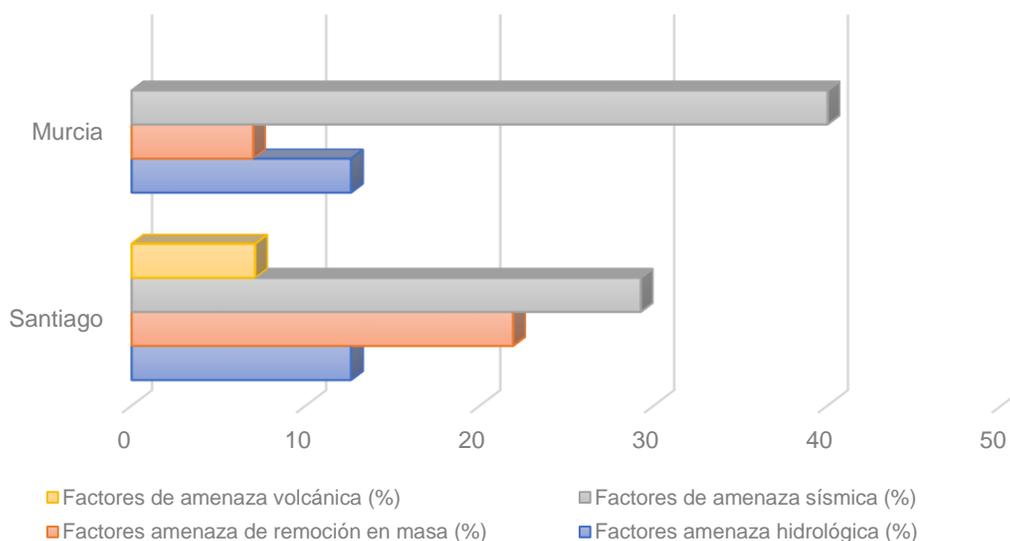
Gráfica 12 Comparativa de la Evolución de Riesgos específicos en la red de distribución de agua potable, en las ciudades de Santiago (Chile), y en Murcia (España).



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se adjunta el incremento de la amenaza, debido a la incidencia de los factores de amenaza específica, según la localización.

Gráfica 13 Incremento de la amenaza específica, e incidencia de los factores de amenaza según localización.



Fuente: Elaboración propia.

La caracterización de los indicadores de susceptibilidad y de resiliencia específica se recoge en las siguientes tablas:

Tabla 113 Indicadores de susceptibilidad física de la red de distribución (RD).

Tabla 114 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de la red de distribución (RD).

Tabla 137 Indicadores de susceptibilidad operacional de la red de distribución (RD).

Tabla 138 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de la red de distribución (RD).

Tabla 161 Indicadores de resiliencia hidrológica de la red de distribución (RD).

Tabla 162 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de la red de distribución (RD).

Tabla 186 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de distribución (RD).

Tabla 187 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de transporte (RT).

Tabla 209 Indicadores de resiliencia sísmica de la red de distribución (RD).

Tabla 210 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de red de la distribución (RD).

Tabla 233 Indicadores de resiliencia volcánica de la red de distribución (RD).

Tabla 234 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de la red de distribución (RD).

6. Conclusiones y Recomendaciones

Se puede concluir que los postulados que definen la metodología de análisis de riesgo propuesta podrían adaptarse a las características de cualquier Sistema de Infraestructuras hidráulicas urbanas, por lo que el objetivo principal establecido con esta investigación se habría conseguido.

La metodología de riesgos hidrológicos y geológicos debe entenderse con un enfoque holístico, equilibrado en su aplicación, y capaz de adaptarse de manera sostenible, a un entorno dinámico (climatológico y tecnológico). Por ello, la caracterización que se ha realizado de las amenazas permite su integración equilibrada y dinámica en la definición de los indicadores específicos de susceptibilidad y de resiliencia, cumpliendo así con este otro objetivo principal planteado.

Mediante esta investigación, cuyos objetivos principales, inicialmente planteados, eran la definición de indicadores representativos de los componentes de la Infraestructura hidráulica, vinculados y homogeneizados en sus rangos de variación y cuyos valores asignados mediante juicio experto, y objetivados a través de la aplicación del Procedimiento de Análisis Jerárquico (PAJ), dotándoles de una estructura integrada, así como la definición, selección y caracterización local de los parámetros críticos, y de los factores de amenaza, construyendo rangos de medición, en base a una microzonificación y ajustando los parámetros generales de dichos factores a las características zonales y de la infraestructura hidráulica ("puntos críticos"), y finalmente obtener el riesgo específico que proporcionará el daño potencial de la Infraestructura, se ha definido una metodología robusta, con capacidad de replicabilidad a cualquier Sistema de Infraestructura hidráulicas urbanas, que permite una gestión dinámica, adaptable, y evolutiva en el tiempo, por lo que los objetivos propuestos se han cumplido satisfactoriamente.

La definición de una metodología de seguimiento de la Gestión de Infraestructuras hidráulicas planteada como otro de los objetivos principales, se ha resuelto con la propuesta planteada ya que permite analizar la evolución de los parámetros y las variables representativas, y ajustar aquellos en un horizonte temporal y según los condicionamientos impuestos al Sistema.

La caracterización de las amenazas hidrológicas (inundación y crecidas), y las amenazas geológicas (remoción en masa, sísmica, y volcánica), vinculadas a la susceptibilidad de la Infraestructura hidráulica mediante la definición de los factores de amenaza representativos de la zona de análisis, y la definición de indicadores de susceptibilidad (físicos y operacionales) y de resiliencia específica, que se ha demostrado con esta investigación, integra de manera coherente y representativa la Infraestructura hidráulica con los efectos específicos que cada tipología de amenaza produciría en una Infraestructura hidráulica determinada, y con ello quedaría demostrada la total integración de cada uno de los componentes del riesgo, lo que representa un avance respecto a la propuesta por otros autores, como Cardona, 2001; Barbat & Cardona, 2003; y Carreño et al., 2006.

Así mismo, como objetivo secundario, se obtendrían los índices de daño por componente, de la infraestructura hidráulica, a partir de la caracterización indicada de la amenaza y de la vulnerabilidad específicas, vinculados a la criticidad de estos, la definición de indicadores generales y de sostenibilidad vinculados al Sistema de Infraestructuras hidráulicas, y la definición metodológica de la gestión de riesgos.

La vinculación de probabilidad de daño y riesgo se ha resuelto mediante la metodología FEMA, NIBS (2004), y los postulados de Giovinazzi S. and Lagomarsino S., (2004), integrando además la criticidad de los componentes de la Infraestructura hidráulica, según la tipología de gestión del Sistema. 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 preliminar, permitiría integrar la información representativa del Sistema de Infraestructuras Hidráulicas, en una plataforma G.I.S., estableciendo escenarios de riesgo potencial, y desarrollar la resiliencia de este, base para la definición de Planes de Gestión de Riesgo.

Se plantean nuevas líneas de investigación para desarrollar la resiliencia de la Infraestructura Hidráulica Urbana, con una visión integral y vinculada a garantizar la continuidad del Servicio, y la calidad del agua, manteniendo la sostenibilidad de aquella.

El proceso de caracterización de la Infraestructura implica la conceptualización previa de las variables operacionales representativas, que definen a la misma, así como una estructuración lógica de los parámetros, los indicadores e índices que intervienen en su caracterización.

La gestión del riesgo, en las Infraestructuras hidráulicas urbanas debería incluir medidas estructurales y no estructurales a aplicar, integradas y vinculadas, para una toma de decisiones objetiva.

La definición del método y de la metodología, como se ha indicado, debería incluir los parámetros de aplicación para un posterior ajuste, según su evolución temporal.

La selección de los indicadores que definen la gestión del riesgo en una Infraestructura crítica hidráulica urbana, implicaría las siguientes etapas

1. Caracterización y análisis de variables, parámetros físicos y operacionales.
2. Análisis de la información histórica de la gestión de la Infraestructura hidráulica y procesos operativos.
3. Integración de variables y construcción de indicadores representativos.
4. Definición del nivel de gestión del Sistema de Infraestructuras hidráulicas.
5. Localización, caracterización y selección de puntos críticos del Sistema de Infraestructuras Urbanas.
6. Definición y aplicación de alternativas de eficiencia operativa y continuidad del servicio.
7. Definición y aplicación de medidas de mitigación del riesgo.
8. Análisis de la evolución de indicadores de gestión de la Infraestructura hidráulica urbana de medidas correctoras.
9. Aplicación a la definición de un Plan de Gestión de Riesgos hidrológicos y geológicos, en las Infraestructuras hidráulicas urbanas.

La definición zonal, exhaustiva y objetiva de las amenazas hidrológicas y geológicas, necesariamente implica un análisis vinculado al impacto zonal y particular sobre la Infraestructura hidráulica urbana, resultando esencial para la definición del impacto sobre la infraestructura hidráulica urbana.

Esta propuesta metodológica se divide en dos principales componentes, por una parte, el análisis de las amenazas extrínsecas hidrológicas y geológicas, y por otra, el análisis de la vulnerabilidad del sistema y el análisis de su evolución.

Las amenazas extrínsecas se definirían mediante los parámetros críticos y los factores de amenaza más representativos, los cuales caracterizarían las amenazas hidrológicas y geológicas analizadas. La intensidad de estos parámetros podría verse afectada por los factores de peligro propios de cada zona, los cuales permitirían, en una próxima entrega, plasmar los distintos valores de amenaza en mapas de peligro. De esta manera se podría determinar gráficamente las tipologías de infraestructura que se encontrarían en áreas de influencia de las amenazas estudiadas.

La vulnerabilidad del sistema de infraestructura hidráulica se dividiría en dos componentes principales, la susceptibilidad intrínseca (física y operacional) y la resiliencia ante eventuales amenazas hidrológicas y geológicas. Los indicadores de susceptibilidad podrían caracterizar la infraestructura hidráulica, en base a poder identificar los puntos críticos de los componentes que presentarían una alta susceptibilidad. Los indicadores de resiliencia cuantificarían el grado de daño de la infraestructura ante la intensidad de las amenazas consideradas, como forma de determinar la capacidad de respuesta de los componentes de la infraestructura hidráulica.

Esta metodología podría constituir, en sí una herramienta para la identificación de los puntos críticos esenciales para la continuidad del servicio, de manera de, posteriormente, poder definir planes de gestión de riesgos, mitigando de esta forma los daños provocados por las amenazas hidrológicas y geológicas consideradas en esta investigación.

La propuesta metodológica, junto con los indicadores de susceptibilidad y de resiliencia propuestos, mediante la aplicación numérica de casos, como los analizados en esta investigación (Infraestructura

hidráulica urbana de EMUASA en la ciudad de Murcia, y de Agua Andinas, S.A. en la ciudad de Santiago de Chile).



7. Nuevas líneas de investigación

La investigación desarrollada, ha implicado el análisis de gran número de factores involucrados en la aplicación metodológica propuesta, y como resultado de ello, se propone completar aspectos relevantes que se consideran esenciales para disponer de una herramienta metodológica más eficiente de aplicación sencilla, y representativa en la gestión de riesgos hidrológicos y geológicos de la Infraestructura hidráulica urbana.

En relación con ello, se propone el análisis, desarrollo y caracterización de nuevas líneas de investigación implicadas en el marco de la gestión de riesgos. Dichas líneas de investigación podrían resumirse en las siguientes:

- Desarrollo de la caracterización física y operacional, y selección de los indicadores representativos de la infraestructura hidráulica urbana, y su vinculación con el nivel de gestión de esta.
- Microzonificación de la infraestructura hidráulica urbana y susceptibilidad operacional. Caracterización de puntos críticos de la red de abastecimiento y de saneamiento, vinculados a las amenazas hidrológica y geológica.
- Vinculación de las investigaciones de riesgo en las Infraestructuras hidráulicas urbanas, con los nuevos planteamientos metodológicos propuestos.
- Desarrollo y aplicación de dispositivos antisísmicos en canalizaciones y dispositivos de operación de instalaciones.
- Caracterización y aplicación de elementos hidráulicos eficientes, y resilientes a las amenazas hidrológicas y geológicas, en la Infraestructura hidráulica urbana, con integración de factores de amenaza locales, y de operación del Sistema.
- Desarrollo de la definición de indicadores representativos de la implantación de dispositivos de monitorización de la Infraestructura hidráulica urbana.
- Desarrollo conceptual de parámetros definitorios de la susceptibilidad de equipamiento de la Infraestructura hidráulica urbana.
- Aplicación de materiales compuestos eficientes en la Infraestructura hidráulica urbana.
- Vinculación de las medidas de mitigación de daños y de la resiliencia de la Infraestructura hidráulica urbana.
- Caracterización de puntos críticos y análisis de alternativas de suministro de la infraestructura hidráulica urbana de agua potable.
- Diseño de infraestructuras hidráulicas urbanas de drenaje, resilientes a las amenazas hidrológicas, y criterios de aplicación.
- Diseño e integración en un Sistema de Información Geográfica (GIS), de bases de datos de gestión de la Infraestructura hidráulica urbana y escenarios de amenaza hidrológica y geológica.
- Redacción de Planes de Gestión de la Infraestructura hidráulica urbana.

8. Artículos generados

Durante la investigación desarrollada, en la fase de análisis y caracterización de la infraestructura, así como en la definición de los indicadores representativos, se han generado diversos artículos relacionados cuyos abstracts se describen a continuación.



8.1. Sediment load estimation in combined sewer systems located in semi-arid areas: a case study



This paper is part of the Proceedings of the 11th International Conference on Urban Regeneration and Sustainability (SC 2016) www.witconferences.com

Sediment load estimation in combined sewer systems located in semi-arid areas: a case study

A. Trapote¹ & R. Egea²

¹Department of Civil Engineering, University of Alicante, Spain ²Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia EMUASA, Spain

Abstract

This paper analyses the Pisano model, commonly used to estimate sediment load in combined sewer systems, and it is discussed its validity in semi-arid areas, which are characterized by irregular and scarce rainfall with short and intense precipitations. The model was applied to the sewer systems of eight watersheds of the city of Murcia (Spain) and it was verified that the value of the sediment load was much lower than the actual results obtained. Upon adjusting the original model by introducing typical semi-arid climatic factors, mainly periods of dry weather, it has been found that the real and theoretical values virtually coincide. The results obtained show that the sediment load is strongly influenced by periods of dry weather, which may be extremely prolonged in semi-arid areas, sometimes extended over 80 days. The results allow the planning of sewer system cleaning to prevent potential environmental impact caused by sewer system overflow into water channels during periods of intense rainfall.

Keywords: sediment load, dry weather periods, semi-arid areas, combined sewer systems, urban runoff, Pisano model.



WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol 204, © 2016 WIT Press www.witpress.com, ISSN 1743-3541 (online)
Doi:10.2495/SC160641

8.2. Natural risks and vulnerability management in urban water supply systems

Sustainable Development and Planning VIII 687

Natural risks and vulnerability management in urban water supply systems

R. Egea¹ & A. Trapote²

¹*Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia, EMUASA, Spain*

²*Department of Civil Engineering, University of Alicante, Spain*

Abstract

In this research, a management model of urban hydraulic infrastructures related to natural hazards is analyzed and shown, and different components of the system are characterized and analyzed, including pipes, premises and equipment, passive and active devices, communications networks, security systems and surveillance, as well as procedures of planning, operating, and maintenance of the infrastructure. The implementation of the methodology proposed can help to make decisions during the process in real time when you find natural hazards, because through their incorporation into a SIG PLATFORM (System Information Geographic) risk scenario, we can generate a first estimation of incidents and damage of the managed territory.

This management model unifies and integrates all the parameters and variables necessary to anticipate and mitigate the possible catastrophic effects (loss of lives, damage to basic infrastructures). Since it raises possible scenarios, which are updated in real time, we can use as a decision-making tool and as a reliable element, that ensures the operation of this essential system for people and human activities in general. The proposed new designs of equipment and devices increase the operational reliability of the system in the case of hydrogeological catastrophic events due to their functional characteristics.

This methodological tool of management is particularly useful. Furthermore, it can be used, as an urban planning instrument and as a basic element to look up the database for the civil defense, damage mitigation and risk control in the hydraulic urban infrastructure system, increasing resilience, and efficient management to the effects of climate change and the greater variability of natural hazards.

Keywords: vulnerability, natural hazards, urban water, risk, reliability.



WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol 210, © 2016 WIT Press www.witpress.com, ISSN 1743-3541 (on-line)
Doi:10.2495/SDP160581

8.3. INFLUENCE OF HYDROGEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL PARAMETERS ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF POTABLE WATER INFRASTRUCTURES

R. E. Pérez, et al., *Int. J. of Safety and Security Eng.*, Vol. 0, No. 0 (2017) 1–15

INFLUENCE OF HYDROGEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL PARAMETERS ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF POTABLE WATER INFRASTRUCTURES

RAMÓN EGEA PÉREZ¹, JESÚS P. CHAZARRA ZAPATA² & FRANCISCO J. LÓPEZ PEÑALVER³

¹EMUASA, Municipal Water and Sanitation Company, Murcia, Spain.

²Engineering Department, University Miguel Hernandez, Orihuela (Alicante), Spain.

³Superior Polytechnic School, Alicante University, Spain.

ABSTRACT

This study analyzes the influence of the urban hydraulic infrastructure behavior, the soil typology and the characterization of the hydrogeological zonal risks, proposing constructive dispositions and procedures, which will increase the reliability of the pipes consisting of a fragile nature, guaranteeing the service continuity even during seismic events with intensity higher than VII (IMM). That would greatly reduce the degree of vulnerability of the urban hydraulic infrastructure, especially in the case of Southeast Spain, which presents a high risk of seismic intensity. Although the effects on the vulnerability of pipelines, of the displacement of the ground, such as fault movements, settlements and lateral expansions, have been widely studied and analyzed, there is no comprehensive methodology, incorporating other factors related to the Management of the infrastructure, and therefore a general application method is proposed that will evaluate in addition to the effects according to the soil typology and the hydrogeological characteristics zonal (hydrological hazard, seismic hazard, and specific hydrogeological factors), the typology of the infrastructure linear hydraulic, based on operational analysis, that allows to correlate the behavior of the soils and the possible affectionation in the potable water pipes, thus serving as planning element and preventive tool for the mitigation of damages.

Keywords: ground motion, hazard, hydrological, liquefaction, management, risk, seismic, vulnerability

1 INTRODUCTION

As it has been observed in different earthquakes, saturated, weakly cohesive granular soils are more susceptible to an increase in the interstitial pressure of the water, causing very loose sands and loss of initial resistance to cutting. The increase in interstitial pressure in the pores generates the amplitude of the oscillatory filtration, according to the size, shape and gradation of the particles, the confinement pressure acting on the soil, the texture of the soil and the rate of over-consolidation of this.

According to Japanese experiences, the damage in linear underground hydraulic infra-structures is much greater in the earthquakes associated with the liquefaction of the soil than in those that are not associated with that effect, the soils being more susceptible, those of flat topography. Therefore, large deformations in the ground are not easily perceived, which makes it difficult to determine the type of soil deformation, which has caused damage in a pipe following a seismic movement.

In general, there are two forms of seismic deformation in the soil, linked to the liquefaction and that could cause damage to buried pipes:

- The dynamic deformation or alternating tension and compression.
- Static strain or tension in one direction.

In addition, in buried pipes, ascending hydrostatic pressures (saturated soils whose behavior can be assimilated to a static fluid) can be produced by the favor buoyancy of the same,

© 2017 WIT Press, www.witpress.com

ISSN: 2041-9031 (paper format), ISSN: 2041-904X (online), <http://www.witpress.com/journals> DOI: 10.2495/SAFE-V0-

N0-1-15

8.4. MITIGATION OF DAMAGE CAUSED TO DRINKING WATER AND SEWAGE PIPES DURING SEISMIC AND HYDROLOGICAL EPISODES

Safety and Security Engineering VII 186

MITIGATION OF DAMAGE CAUSED TO DRINKING WATER AND SEWAGE PIPES DURING SEISMIC AND HYDROLOGICAL EPISODES

RAMÓN EGEA PÉREZ¹, JESÚS P. CHAZARRA ZAPATA², FRANCISCO J. PÉREZ DE LA CRUZ³ & FRANCISCO J. LÓPEZ PEÑALVER⁴
¹EMUASA, Municipal Water and Sanitation Company, Spain ²Engineering Department, University Miguel Hernandez, Spain ³Polytechnic University of Cartagena, Spain ⁴Superior Polytechnic School, Alicante University, Spain

ABSTRACT

In the present investigation, the development and implementation of different typologies of elements and devices that increase the reliability of pipes of a fragile nature is proposed. This ensures continuity of a drinking water supply and sewerage, which is especially necessary during and after natural disasters related to hydrology and seismicity and is even more necessary to alleviate its adverse effects. Drinking water supply and sanitation networks, as basic elements of urban water infrastructure, can generate a high degree of vulnerability in the case of a seismic movement or an episode of heavy rain, which requires the adoption of new designs of elements or devices and resilient materials to absorb the stresses generated and the mechanical loads occurring during such risk episodes. Experience has shown that the piping of metallic materials (ductile iron, steel, and other alloys), and reinforced concrete, although more rigid than plastic pipes (polyethylene, PVC, fiberglass reinforced polyester PRFV), has a capacity to absorb movements, which is mainly due to the one provided by the unions, since it generates a flexibility as a whole (pipe and joints) that improves the behavior of the system (increases “ductility”) that decreases the vulnerability of linear hydraulic infrastructures. The selection, analysis and application of these elements is fundamental to improving the reliability of these basic urban infrastructures, especially in areas exposed to hydrogeological risks, such as Southeastern Spain with a moderate probability of seismic events of an intensity higher than VII, and with episodes of intense rains of torrential nature, and their derived risks. The increase in the resilience provided by these elements or devices will increase the operational reliability of the linear hydraulic system of potable water and sewage, reducing the degree of vulnerability of the same, and mitigating economic, social and environmental damages.

Keywords: resilience, vulnerability, natural hazards, seismic, hydrological, risk, sustainability, reliability.

1 INTRODUCTION

From the analysis performed, strategies are presented to mitigate the possible anomalous effects generated by the seismic movements and those induced by intense rainfall events. For this purpose, the nature of the ground layers located in the consolidated subsoil is considered and it is recommended the provision of specific foundation elements that distribute the loads and standardize the possible induced differential seats, as well as the use of “dynamic” anchor elements in Linear Hydraulic Infrastructure and specific installation procedures.

During the last few years, some low intensity seismic movements (<3 IMM) have been registered and located in the Southeastern area of the municipality of Murcia, as shown in the following graphs (Figs 1 and 2).

At the same time and based on different studies of seismic information in the European Mediterranean Area [1], the values of peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV) for its application to the City of Murcia, Fig. 3.



9. Glosario

AC: acueducto.

Acueductos: Son conducciones revestidas completamente, con flujo lámina libre de gran sección que portean agua en forma gravitacional desde una zona de mayor cota a otra de menor cota, y por tanto no es en presión, existiendo un desfase de tiempo desde que el agua ingresa al acueducto y sale por una derivación (aducción). En general, en los acueductos hay conectadas derivaciones, las que a su vez alimentan los estanques de cabecera de los sistemas de distribución.

Aducción: Red urbana de transporte de agua potable.

Alimentadoras: Red principal de distribución de agua potable.

Amenaza, peligro o peligrosidad (H): Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.

CARL: pérdidas de agua reales anuales.

CS: Captación superficial.

Dominio (D): es el ámbito espacial de aplicación de indicadores e índices.

Ecuación o formulación: define matemáticamente la relación entre variables e indicadores. En algunos casos puede representar la relación entre diferentes indicadores o índices.

Elementos en riesgo (E): En este caso sería la Infraestructura Hidráulica Urbana, expuesta a una amenaza en un área determinada.

EMB: embalse.

EST: estanque o depósito de agua potable.

Factor: es el elemento condicionante de una amenaza o bien elemento o característica que condiciona un indicador.

ILI: índice de pérdidas representado por el cociente entre las pérdidas de agua reales anuales (CARL), y las pérdidas reales anuales inevitables (UARL).

Indicador (I_{ik}): utilizado algunas veces como índice, expresa el valor de una variable en un contexto real o empírico (cuantitativo). Normalmente se expresa en tasa o razón, y en porcentaje para poder comparar indicadores de naturaleza similar. Se pueden establecer rangos de valores para comprar diferentes Sistemas.

Índice (I): En general es una combinación de indicadores de naturaleza dispar que proporciona un valor correlacionable entre diferentes Sistemas mediante el establecimiento de rangos.

Parametrizar: operación algebraica para estandarizar o estructurar la información o base de datos.

Parámetro: variable o constante que mejor representa una función matemática.

PC: Pozo de captación de agua subterránea.

PEAP: Planta elevadora de agua potable o estación de bombeo de agua potable (EBAP).

PEAS: Planta elevadora de aguas servidas o estación de bombeo de aguas residuales (EBAR).

Peligrosidad sísmica (P): Probabilidad de que en un intervalo de tiempo y como consecuencia de la sismicidad y del medio de propagación de las ondas sísmicas se supere en determinada zona un valor del parámetro crítico que mida el movimiento del suelo.

PGA: Aceleración sísmica máxima del terreno (%g).

PGV: Velocidad sísmica máxima del terreno (cm/s).

PTAP: Planta o estación de tratamiento de agua potable (ETAP).

PTAS: Planta de tratamiento de aguas servidas, o estación depuradora de aguas residuales (EDAR).

Rango (r_n): comprende los valores posibles que puede tomar un indicador o un índice, y está constituido por unos valores extremos (mínimo, y máximo). Dichos valores representan la escala de variación de los indicadores o índices.

RAS: Red de aguas servidas o red de alcantarillado.

Resiliencia (R): indica la capacidad de recuperación de la infraestructura en caso de falla de ésta. Si se considera un período de tiempo T_f , en el cual el sistema de infraestructura se encuentra en estado de falla, la resiliencia podría ser definida como el inverso del valor de T_f . Es decir $R = \frac{1}{T_f}$, siendo T_f el tiempo en que la infraestructura permanece en falla.

Riesgo específico (Rs): Es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.

Riesgo total (Rt): Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un desastre, es decir el producto del riesgo específico, R_s , y los elementos en riesgo, E .

Saneamiento: Sistema unitario (aguas servidas y pluviales).

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería.

SISMIMUR: Plan de Riesgo Sísmico de la Región de Murcia.

UARL: pérdidas reales anuales inevitables.

Variable: expresión simbólica que representa un componente de la infraestructura y expresa una característica de esta. Puede ser cualitativa o cuantitativa.

Vulnerabilidad (V): Es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo como resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.

Vulnerabilidad sísmica (V): es el grado de pérdida de un elemento en riesgo expresado en una escala de 0 (sin daño) a 1 (daño total), que resulta de la ocurrencia de un terremoto de una determinada magnitud.

10. Referencias

- AGUARÓN, J., ESCOBAR, M., & MORENO-JIMÉNEZ, J. (2001). Consistency Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems.
- Aguas Andinas. (2017). *Memoria Anual 2016*.
- Aguilera Saez, D. M. (2016). *Riesgo Volcánico a escala nacional/regional: estudio comparado de variantes metodológicas, para su evaluación y adaptación al contexto volcánico de Chile*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Alguacil de la Blanca, G., & Vidal Sánchez, F. (2012). *Parámetros de la fuente y del movimiento del suelo del terremoto de Lorca de 2011*. Granada, España.
- ATC-13. (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California*. Applied Technology Council. Redwood City, California: Applied Technology Council.
- AWWA,. (1994). *Factores asociados al potencial de licuefacción*.
- Ballantyne, D. (2010). Seismic vulnerability assessment and design of pipelines. *Journal American Water Works Association*, 88-97.
- Banco Interamericano de Desarrollo BID. (2015). *Indicadores de Riesgo de Desastre y Gestión de Riesgos. Programa para América Latina y el Caribe. Chile*. <http://www.iadb.org>. Washington, D.C., U.S.A.
- Banco Interamericano de Desarrollo BID. Departamento de Desarrollo Sostenible. (2005). *Indicadores de riesgo de desastre y gestión de riesgos: Programa para América Latina y el Caribe; Informe resumido*. Omar Darío Cardona A. Washington, D.C.), U.S.A.
- Barbat A.H. & Pujades L. (2004). *Evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a la ciudad de Barcelona*. Barcelona (España).
- 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*.
- Benson C., U. N. (2003b). *Potential approaches to the development of indicators for measuring risk from a macroeconomic perspective, Programa de Indicadores de Riesgo y Gestión de Riesgos BID/IDEA*. <http://idea.unalmzl.edu.co>. Bogotá (Colombia), Colombia.
- BID, C. e. (2003-2005). *Información e Indicadores de Riesgo y Gestión de Riesgos*.
- Birkmann, J. (2006). *Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies*. New York, USA: United Nations University Press.
- Briguglio, L. (2003a). *Some Considerations with regard to the construction of an index of disaster risk with special reference to Islands and Small States, Programa de Indicadores de Riesgo y Gestión de Riesgos BID/IDEA*. <http://idea.unalmzl.edu.co>. Manizales, Bogotá (Colombia).
- Briguglio, L. (2003b). *Methodological and practical considerations for constructing socioeconomic indicators to evaluate disaster risk, Programa de Indicadores de Riesgo y Gestión de Riesgos BID/IDEA*. <http://idea.unalmzl.edu.co> Universidad. Manizales (Colombia).
- Brundtland. (1987). Informe Brundtland de Desarrollo Sostenible.
- Campbell, K., & Bozorgnia, Y. (2003). Updated near-source ground motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra,. En *Bulletin of the Seismological Society of America*, (págs. 314-331).
- Campbell, K., & Bozorgnia, Y. (2008). Campbell, K. W. and Y. Bozorgnia (2008), NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10s, . En *Earthquake Spectra*, 24(1), (págs. 139-171).
- Campos Maza, F. P. (2014). *Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en al quebrada de los chanchos, Región Metropolitana, Chile*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Campos, J., Ruiz, S., Pérez, A., Ruiz, J., Kausel, E., & Thiele, R. (2005). *Terremotos Corticales de las Melosas 1958, Chusmiza 2001 y Curicó 2004: Un Análisis Comparativo de los Terremotos de Northridge 1994 y Kobe 1995. Nuevos Antecedentes para el Peligro Sísmico en Chile*. Concepción, Chile: Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, No. 9.

- CAPRA . (2010). http://www.ecapra.org/capra_wiki/es_wiki/index.php?title=CAPRA-GIS. [consulta 22 de marzo de 2010].
- Cardona O.D. (2001). *Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España: Tesis Doctoral.
- 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*. London (UK).
- Cardona, O. (2006). "A System of Indicators for Disaster Risk Management in the Americas" in *Measuring Vulnerability to Hazards of Natural Origin: Towards Disaster Resilient Societies*. Tokyo, (Japón): J. Birkmann, United Nations University Press.
- Cardona, O., Hurtado, E. J., Duque, G., Moreno, A., Chardon, A., & Velásquez, S. y. (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, Manizales*. <http://idea.unalmz.edu.co>. Manizales (Colombia).
- Carreño M.L. Cardona O.D. Barbat A.H. (2006). "Urban seismic risk evaluation: a holistic approach", *Journal of Natural Hazards*. Dordrecht (Países Bajos): Springer.
- 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.
- Carreño, M.-L., Cardona, O. D., Marulanda, M. C., Barbat, A. H., ., & . (2006). *Evaluación del riesgo sísmico urbano: un enfoque holístico*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Centro Sismológico Nacional (GUC). (7 de febrero de 2018). CSN. Obtenido de Universidad de Chile: <http://www.csn.uchile.cl/sismologia/grandes-terremotos-en-chile/>
- CIIFEN. (7 de febrero de 2018). *Centro Internacional para la investigación del Fenómeno de El Niño*. Obtenido de http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=84&Itemid=336&lang=es
- CONAE. (2009). *Inundaciones: ¿Qué es Susceptibilidad?* Comisión Nacional de Actividades Espaciales y Departamento de Desarrollo Sostenible de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos.
- Contreras, M. T. (2016). *Modeling of flash floods in the andean foothills: Reducing the uncertainty associated with the sediment concentrations*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- CORDIS-SYNER-G. (2012). *SYNER-G: Systemic seismic vulnerability and risk assessment of complex urban, utility, lifeline systems and critical facilities: Methodology and applications*. .
- Corsanego, A., & Petrini, V. (1990). *Seismic vulnerability of buildings*. Trieste, Italia: Proceedings of the SEISMED 3.
- D.M., A. S. (2016). *Riesgo volcánico a escala nacional/regional: Estudio comparado de variantes metodológicas, para su evaluación y adaptación al contexto volcánico de Chile. Tesis grado de Magister en Ciencias. Mención Geología*. Santiago (Chile).
- Davis, I. (2003). *The Effectiveness of Current Tools for the Identification, Measurement, Analysis and Synthesis of Vulnerability and Disaster Risk, Programa de Indicadores de Indicadores de Riesgo y Gestión de Riesgos BID/IDE. U. N. Colombia*. <http://idea.unalmz.edu.co>. Manizales (Colombia).
- DELNET-ONU. (2009). *Programa Delnet, la reconstrucción Postdesastre: una oportunidad para avanzar hacia el desarrollo sostenible*. Centro Internacional de Formación de la OIT.
- Egea Pérez Ramón, C. Z. (2017). *Influence Of Hydrogeological And Geotechnical Parameters On The Seismic Behavior Of Potable Water Infrastructures*.
- Egea Pérez, R. J. (2017). *Mitigation Of Damage Caused To Drinking Water And Sewage Pipes During Seismic And Hydrological Episodes*. . Alicante: WITpress.
- Egea R. et al. (2017). *Natural Risks And Vulnerability Management In Urban Water Supply Systems*. Alicante.

- Eidinger, J. M., & Ávila, E. A. (1999). *Guidelines for the seismic evaluation and upgrade of water transmission facilities (Vol. 15)*. ASCE Publications.
- EMUASA. (2017). *Memoria Anual 2016*.
- Escuder-Bueno, I., Castillo-Rodríguez, J., Perales-Momparler, S., & Morales-Torres, A. (2011). *SUFRI Methodology for flood risk evaluation in urban areas. Decision guidance for decision maker. Report SUFRI project. WP3*.
- Escuder-Bueno, I., Serrano-Lombillo, A., Fluixa-Sanmartin, J., & Morales-Torres, A. (2012). *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*. London (U.K.): Taylor & Francis Group. doi:ISBN 978-0-415-62078-9
- Faccioli E. and Resendiz, D. (1976). *Soil dynamics: behavior including liquefaction, in Seismic Risk and Engineering Decisions, Lomnitz and Rosenblueth, pp71-140, chap4*. Nueva York: ElsevierScientificPublishing Co.
- FEMA-HAZUS. (2004). *HAZUS-MH MR2 Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency.
- Ferrando A, F. J. (2014). *Determinación de amenazas y análisis de riesgos del Sector Precordillerano de la Comuna de La Florida*. Santiago, Chile.
- Fock A. (2005). *Cronología y Tectónica de la exhumación en el neógeno de los Andes de Chile Central entre los 33° y 34° Sur. Tesis de Magister*. Santiago (Chile): Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- González de Vallejo. (2002). *Ingeniería Geológica*.
- Hernández M. A. et al., .. (2009). *Un metodo para estimar la sensibilidad hidrológica aplicado en la cuenca del Golfo San Jorge. Provincia de Chubut. Argentina*. ISSN: 0366-0176.
- Hernández Rodriguez, L. (. (2012). *Metodología de evaluación del riesgo público por inundación por falla del sistema de alcantarillado pluvial. Caso de la Cuenca del río Salitre*. Bogotá (Colombia).
- IDEA . (2005). *Indicadores para la Gestión de Riesgos, Operación BID ATN/JF-7907-RG. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Disponible en: <http://idea.unalmz.edu.co>*. Manizales (Colombia).
- IDNDR-RADIUS. (1999). *Guidelines for the implementation of earthquake risk management projects*. International Decade for Natural Disaster Reduction.
- ISDR-ONU. (2000). *Disaster Prevention, Education and Youth. The specific case of wildfires*.
- J.R.C.-E.C. (2003). *First Workshop on Composite Indicators of Country Performance. Applied Statistics Group, Joint Research Centre, European Commission, Institute for Protection and Security of the Citizen Technological and Economic Risk Management*. . Ispra (Italia).
- Kircher, C. A., Reitherman, R. K., Whitman, R. V., & Arnold, C. (1997). *Estimation of Earthquake Losses to Buildings*.
- Lagomarsino S. & Giovinazzi S. (2006). *Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings*. Genova (Italy).
- Lambert A and Mckenzie R. (2002). *“Practical Experience in using the Infrastructure Leakage Index” Paper to IWA Conference “Leakage Management – A Practical Approach”, Cyprus, November 2002, (download from www.liemberger.cc)*.
- Lara Yañez N.E. (2013). *Susceptibilidad de licuefacción en la Comuna de Doñihue. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile*. Santiago, Chile.
- Lara, M. (2007). *Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de remociones en Masa con Aplicación en la Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Leila Constanza Hernández Rodríguez , I. (2012). *Una metodología de evaluación del riesgo público por inundación por falla del sistema de alcantarillado pluvial - caso de la cuenca del río Salitre, Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia.
- Liemberger R., B. K. (2007). *Water Loss Performance Indicators*. World Bank Institute.
- Maskrey Andrew. (1998). *Navegando entre brumas: la aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis de riesgos en América Latina. ITDG/LA RED. Tercer Mundo Editores*. . Colombia.

- Masure, P. (2003). *Variables and indicators of vulnerability and disaster risk for landuse and urban or territorial planning*, IDB Programa de Indicadores de Riesgo y Gestión de Riesgos BID/IDEA, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. <http://idea.unalmz.edu.co> . Manizales (Colombia).
- Mitchell, T. (2003). *An operational framework for mainstreaming disaster risk reduction*, Benfield Hazard Research Centre Disaster Studies, Working Paper 8.
- Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., & Masure, P. (2004). The european Risk-UE project: an advanced approach to Earthquake risk scenarios. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada.
- Munda G. (2003). *Methodological Exploration for the Formulation of a Socio-Economic Indicators Model to Evaluate Disaster Risk Management at the National and Sub-National Levels. A Social Multi-Criterion Model*. Programa BID/IDEA de Indicadores para la Gestión de Riesgos. Manizales, Colombia., Colombia.
- Muñoz E. (2013). *Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del mar, V región. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias mención Geología*. Universidad de Chile, FCF.M.
- Naranjo, J. A., & Varela, J. (1996). *Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de mayo de 1993*. Santiago de Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- New Zealand Water& Wastes Association. (2002). *Benchmarking of Water Losses in New Zealand (Incorporating the User Manual for the BenchlossNZ Software: Version 1A)*. User Manual ISBN 1-877134-35-X; ISBN for CD is 1-877134-39-2. Manual available from NZWWA. New Zealand.
- Olave, D. (2003). *Sumario de indicadores e índices relacionados con la evaluación de la vulnerabilidad, la amenaza y el riesgo por eventos naturales*. Programa de Información e Indicadores de Gestión Riesgos Desastres Naturales, BID – CEPAL – IDEA, Operación ATN/JF-7907-RG. Manizales (Colombia).
- Oliveira, C. ..., Roca, A., & Goula, X. (2006). *Assessing And Managing Earthquake Risk: Geo-scientific and Engineering Knowledge for Earthquake Risk Mitigation: developments, tools, techniques*. Springer.
- Ollero Ojeda, A. (1996). *Dinámica de meandros y riesgos hidrogeomorfológicos en encalá de ebro y cabañas de ebro*. IV Reunión de Geomorfología. Sociedad Española de Geomorfología.
- Olmos, J. (2013). *Estudio de amenaza y vulnerabilidad por fenómenos de Remoción en masa*.
- ONEMI. (1991). *Inundaciones Región Metropolitana 1982/ 1987*. Oficina Nacional de Emergencia.
- ONEMI. (1995). *Serie estudio del caso Aluvión de La Florida* . Oficina Nacional de Emergencia.
- ONEMI. (2006). *Metodología básica para la elaboración de un plan de prevención y respuesta por actividad volcánica (ACCEVOL)*. Oficina Nacional de Emergencia.
- Padilla C. (2006). *Análisis de factores meteorológicos desencadenantes de remociones en masa en el sector oriente de Santiago*. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- 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).
- PATRICOVA-Generalitat Valenciana. (2015). *PATRICOVA: Plan de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana*.
- Perez Contreras, A. (2012). *Metodología para la Gestión del Riesgo Volcánico*. Pontificia Universidad Católica de Chile. ONEMI. Santiago (Chile).
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J. C., & Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Reserach*, 41, 17-77.
- Pineda Porras, O., & Ordaz, M. (2007). A new seismic intensity parameter to estimate damage in buried pipelines due to seismic wave propagation is proposed. *Journal of Earthquake Engineering*.
- RISK-UE. (2004). An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. WP4: Vulnerability of current buildings.

- Rodriguez, A. H. (2011). *Análisis y evaluación de riesgo sísmico en líneas vitales. Caso de estudio Bogotá D.C.* Universidad Nacional de Colombia.
- Rouse, M. (2014). *The worldwide urban water and wastewater infrastructure challenge*. International Journal of Water Resources Development, 30, 20-27. doi: 10.1080/07900627.2014.882203.
- Saaty Thomas L. (1980). *The Analytic Hierarchy Pocess*. Ed. McGrawHill.
- Sanchez González. (2011). *Riesgo Volcánico*.
- SERNAGEOMIN. (08 de febrero de 2018). *Glosario volcánico*. Obtenido de <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/glosario-volcanico.php>
- SERNAGEOMIN. (07 de Febrero de 2018). *Red Nacional de Vigilancia Volcánica de Chile*. Obtenido de <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/volcanes.php>
- Silva, N. A. (2008). *Caracterización y determinación del peligro sísmico en la región metropolitana*. Universidad de Chile.
- SRM-LIFE. (2007). *Development of a global methodology for the vulnerability assessment and risk management of lifelines, infrastructures and critical facilities. Application to the metropolitan area of Thessaloniki*. Greece: Research Project, General Secretariat for Research and Technology.
- Stepp, J. (1972). *Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and Its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard Proc. Microzonation Conf. Univ. Seattle. Washington. Seattle, Washington (USA)*.
- SUBDERE. (2011). *Guía Análisis de riesgos naturales para el ordenamiento territorial*. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo.
- Tortajada C. (2010). *Water governance: Some critical issues*. International Journal of Water Resources Development, 26, 297– 307.
- Trapote A., Egea R. (2016). 8.1. *Sediment load estimation in combined sewer systems located in semi-arid areas: a case study*. Alicante.
- UNDRO. (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis: report of Expert Group Meeting (9-12 July 1979)*. Geneva, Switzerland: Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator.
- USGS-NVEWS. (2005). *National Volcano Early Warning System*. U.S Geological Survey.
- Vargas Cuervo, G. (2000). *Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa*.
- Vargas, J. E. (2002). *Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Varnes, D. J. (1978). *Slope movement types and processes*. In *Landslides, Analysis and Control*.
- Varnes, D. J. (1978a). *Slope movement types and processes*. In *Landslides, Analysis and Control*.
- Vidal, C., & Mardonez, M. (2011). *La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción*.
- Zhou S. (1980). *“Evaluation of the Liquefaction of Sand by Static Cone Penetration Test”*. 7th WCEE, Istanbul, Turkey.

Anexos

Anexo 1: Esquema de desarrollo metodológico.

El desarrollo de la metodología propuesta se estructura a partir de la construcción de los indicadores obtenidos en el epígrafe anterior.



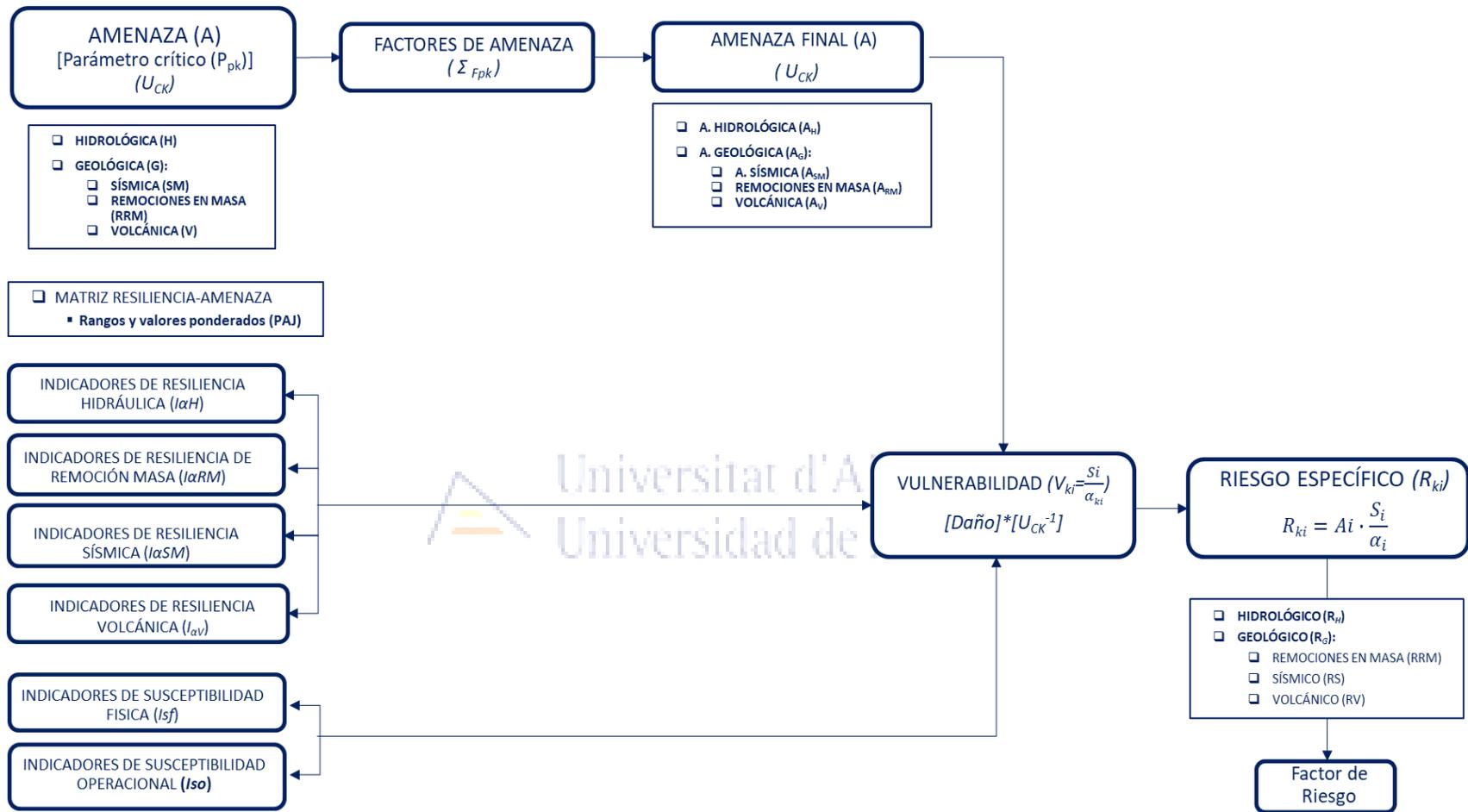


Figura 30 Flujo de desarrollo de la obtención del Riesgo específico. Factor de riesgo. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2: Parámetros de Amenaza

A.2.1 Amenaza Hidrológica.

A continuación, se adjuntan los niveles de peligrosidad de inundación en base al calado (c), periodo de retorno (T), y la frecuencia propuesta, PATRICOVA, 2015.

Tabla 62 Peligrosidad hidrológica. Nivel, frecuencia, parámetro crítico, periodo de retorno (T), y rangos de variación.

PELIGROSIDAD HIDROLÓGICA (*)				
Nivel	Frecuencia	Parámetro	T (años)	Valoración
Nivel 1	ALTA	$c > 0,04$	$T < 25$	80-100
		Máx.> 80 cm		
Nivel 2	MEDIA	$0,04 > c \geq 0,01$	$25 \leq T \leq 100$	60-80
		Máx.> 80 cm		
Nivel 3	ALTA	$c > 0,04$	$T < 25$	45-60
		$15 \text{ cm} \leq T \text{ máx.} \leq 80 \text{ cm}$		
Nivel 4	MEDIA	$0,04 > c > 0,01$	$25 \leq T \leq 100$	30-45
		$15 \text{ cm} \leq T \text{ máx.} \leq 80 \text{ cm}$		
Nivel 5	BAJA	$0,01 < c < 0,02$	$100 \leq T \leq 500$	15-30
		Máx.> 80 cm		
Nivel 6	BAJA	$0,01 > c > 0,002$	$100 \leq T \leq 500$	0-15
		$15 \text{ cm} \leq T \text{ máx.} \leq 80 \text{ cm}$		

Fuente: (PATRICOVA-Generalitat Valenciana, PATRICOVA: Plan de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana, 2015). Adaptada.

Según la Metodología seguida en el desarrollo del Plan de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación de la Comunidad Valenciana (PATRICOVA), 2015. (*) Incremento nivel de peligrosidad cuando hay un incremento de Max o de velocidad del 10% y >10 cm para T (25-500 años).

En la siguiente Tabla 63, se indican los niveles de gravedad o de peligrosidad hidrológica (Inundación) y factor o escala de amenaza, según la metodología PATRICOVA, 2015. Siendo c (calado o altura de agua), y v (velocidad del flujo).

Tabla 63 Niveles de gravedad o de peligrosidad hidrológica. Descripción, parámetros y factor.

Gravedad	Descripción	Parámetros	Factor
Extrema	Zonas de condiciones hidráulicas con calado $c > 4$ m	$c > 4$ m	6
	Zonas hidráulicas con velocidad $v > 6$ m/s o con $cv > 2$ m ² /s	$v > 6$ m/s	
		$cv > 2$ m ² /s	
Muy alta	Zonas de condiciones hidráulicas con $4 \geq c \geq 2$ m	$2 < c \leq 4$ m	4
	Velocidad $3,5 \leq v \leq 6$ m/s	$3,5 < v < 6$ m/s	
	$cv > 1$ m ² /s	$1 < cv < 2$ m ² /s	
Alta	Zonas de condiciones hidráulicas con $1 \leq c \leq 2$ m	$1 < c \leq 2$ m	2
	Velocidad $1 \leq v \leq 3,5$ m/s y $cv > 0,5$ m ² /s	$1 < v < 3,5$ m/s	
		$0,5 < cv < 1$ m ² /s	
Moderada	Zonas de condiciones hidráulicas con $c > 4$ m	$0,4 < c < 2$ m	1
	Velocidad $v > 0,4$ m/s y $cv > 0,08$ m ² /s	$0,4 < v < 1$ m/s	
		$0,08 < cv$	
		$< 0,5$ m ² /s	
Baja	Zonas hidráulicas con calada $c < 0,4$ m $v < 0,4$ m/s $cv < 0,08$ m ² /s	$c \leq 0,4$ m	0,5
		$v \leq 0,4$ m/s	
		$cv \leq 0,08$ m ² /s	

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra la determinación de amenazas y análisis de riesgo del sector precordillerano de la Comuna de La Florida. Ferrando A., F.J. (2014)

Tabla 64 Frecuencia, periodos de retorno e Intensidad, y niveles de amenaza, en relación a precipitaciones y caudales máximos,

Nivel de amenaza	Frecuencia	Periodo de retorno T (años)	Intensidad máxima de Precipitación, P ₂₄ (mm)	Altitud (m.s.n.m.)	Q _{máx} (m ³ /s)
Baja	Muy alta	$T \leq 10$	82-88	847	28-33
Media	Alta	$10 < T \leq 20$	102-110	847-1000	> 33-40
Alta	Media	$20 < T \leq 30$	110-150	1500	40-43
Muy alta	Baja	$50 < T \leq 100$	> 150	> 1500	> 50

Fuente: (Ferrando A., 2014)

La frecuencia en que ocurra una inundación o un movimiento en masa dependerá entre otros factores, de la recurrencia de precipitaciones extremas y de los caudales excepcionales generados por ellos, según se ha mostrado en la Tabla 64.

A.2.1.1. Factores de amenaza hidrológica

Como se ha indicado a partir de la selección del parámetro crítico hidrológico, en ese caso la altura y la velocidad máxima del flujo, se analizan los parámetros de amenaza hidrológica propuestos en base al análisis de la información recabada y el potencial de afectación según la localización.

Los factores seleccionados y el peso máximo de afectación estimado en base a las investigaciones analizadas, de cada uno de ellos son los indicados en la Tabla 65.

Tabla 65 Factores de amenaza hidrológica. Valores min-máx. Ponderaciones.

Factores de amenaza hidrológica (FpH)					
Denominación	Nombre del factor	Valor mín.	Valor máx.	Peso	26,90%
<i>F_{PH1}</i>	Nivel freático [0-0.13]	0,00	0,13	0,388	0,047
<i>F_{PH2}</i>	Tipo de terreno Coef. Permeabilidad [0-0.08]	0,00	0,08	0,313	0,038
<i>F_{PH3}</i>	Coefficiente de escorrentía, Ce [0-0.10]	0,00	0,06	0,300	0,036
TOTAL				1.00	0,121

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran los factores de amenaza seleccionados y los valores incrementales (mínimos y máximos), así como sus pesos parciales, porcentaje incremental respecto al valor de la amenaza zonal y su valor total. El nivel freático, el coeficiente de permeabilidad, y la escorrentía generada, se han seleccionado por el tipo de terrenos, la baja permeabilidad de los terrenos, así como carecer de vegetación que contenga el flujo de escorrentía.

Los rangos de amenaza, así como los rangos de los factores de amenaza, y los valores extremos, han sido propuestos en base a las investigaciones existentes consultadas, pudiendo variar según las características geológicas y geográficas de la zona de estudio. En general y según el análisis de numerosos eventos hidrológicos (inundación y crecidas) acaecidos en diferentes zonas tanto en América como en Europa se observa una tendencia en la relevancia, en cuanto a factores de amenaza e importancia de estos.

Nivel freático > Pendiente terreno > Tipología de terreno > Coeficiente de escorrentía

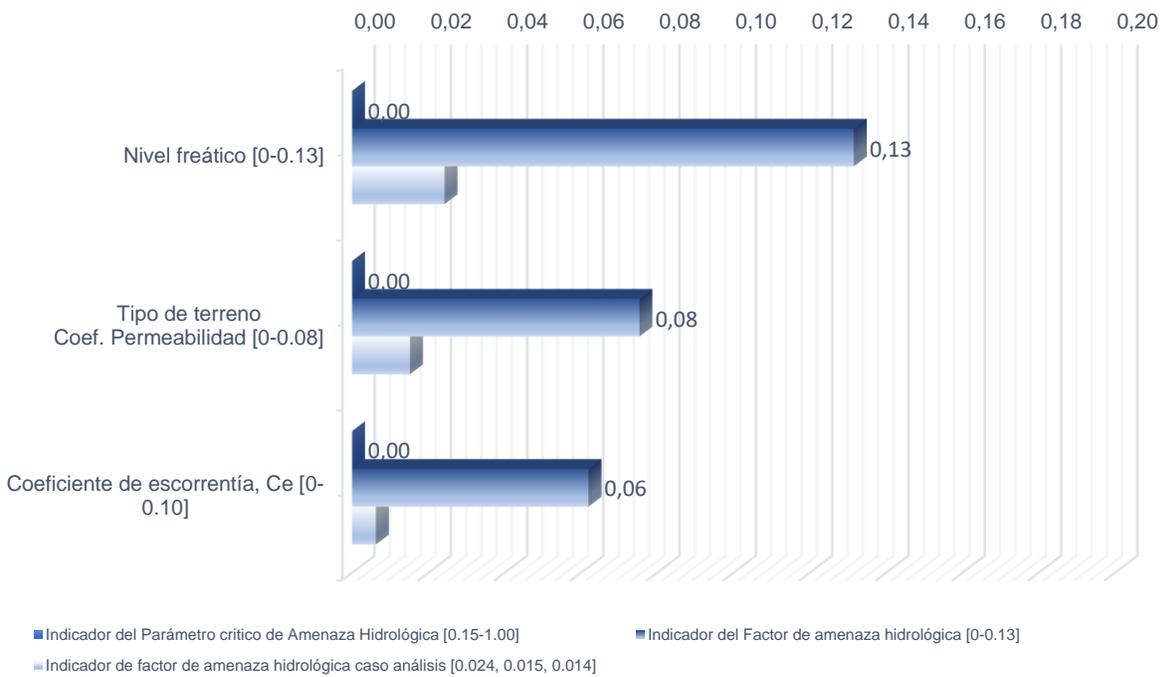


Figura 31 Amenaza hidrológica y factores de amenaza. Rangos y valores.

Fuente: Elaboración propia.



Universidad de Alicante
Universidad de Alicante

Luego la amenaza hidrológica final, es decir la afectada por los factores de amenaza indicados, vendría dada por la siguiente expresión:

$$A_H = P_{pH} \cdot \prod F_{pH} = P_{pH} \cdot (F_{pH1} \cdot F_{pH2} \cdot F_{pH3})$$

A.2.2. Amenaza Geológica.

A.2.2.1. Amenaza de remoción en masa.

A continuación, se adjuntan diversos parámetros y otros factores de amenaza de remoción considerados en el análisis de la amenaza de masa, que se incorporan para la obtención de la susceptibilidad específica de la Infraestructura hidráulica según su localización (zonas urbanas o periurbanas), la geología, la morfología del lugar, la climatología, y los episodios ocurridos.

- Zonas y niveles de Peligro general (Muñoz, 2013).

Tabla 66 Zonas y Niveles de peligro de remoción en masa.

Zona	Nivel	Descripción
	Nula	Zona con características estables.
	Baja	Zonas con suelos, pendientes y geología estables aún ante fenómenos intensos y extensos como precipitación. Puede producirse soliflucción de material.
	Media	Zonas con materiales muy poco o nada fracturados, con pendientes de 30 a 50 %. El material se inestabiliza tras actuaciones naturales muy intensas y/o extensas, así como a la acción de la precipitación de la zona.
	Alta	En zonas con pendientes de 50 a 100 %. En suelos poco cohesivos y en rocas meteorizadas, fracturadas o de otro tipo de discontinuidad, acelerado por las precipitaciones de la zona.
	Muy alta	En zonas con pendientes >100%. En suelos no consolidados y rocas muy meteorizadas y fracturadas, acelerado por factores climáticos, sismotectónicos y antrópicos.

Fuente: (Muñoz E., 2013)

- Factores máximos considerados en deslizamientos superficiales de suelo, modificado en Muñoz (2013).

Factor	Descripción	Ponderación (%)
Geomorfología	Pendiente promedio de la ladera. <i>(f1)</i>	35%
	Altura máxima de la unidad. <i>(f2)</i>	
	Exposición al sol. <i>(f3)</i>	
	Forma. <i>(f4)</i>	
Geología-Geotecnia	Características geológicas-geotécnicas de la unidad. <i>(f5)</i>	25%
	Cercanía a falla mayor y/ o zona de cizalla. <i>(f6)</i>	
Clima-vegetación	Condición de humedad en la ladera. <i>(f7)</i>	20%
	Presencia vegetación. <i>(f8)</i>	
Antrópico	Estabilización/Desestabilización artificial de laderas. <i>(f9)</i>	10%
Antecedentes	Deslizamientos de suelo declarados. <i>(f10)</i>	10%

Siendo el Índice de susceptibilidad para deslizamientos superficiales (IS_{DSS}), el indicado en la siguiente expresión:



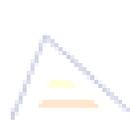
$$IS_{DSS} = \left(\sum_{i=1}^{10} f_i \right) \cdot f_{11}$$

Si el material es rocoso, entonces IS_{DSS} será nulo ya que el material es incompatible con el analizado (suelo, f_{11}).

- Factores máximos considerados en flujos, modificado en Muñoz (2013).

Factor	Descripción	Ponderación (%)
Geomorfología	Pendiente del canal de drenaje. <i>(f1)</i>	35%
	Encajamiento del canal de drenaje. <i>(f2)</i>	
Geología-Geotecnia	Características geológicas-geotécnicas de la unidad. <i>(f3)</i>	30%
	Condición de humedad y saturación en la ladera. <i>(f4)</i>	
	Cercanía a falla mayor y/ o zona de cizalla. <i>(f5)</i>	
Vegetación	Características y rol de la vegetación. <i>(f6)</i>	10%
Antrópico	Presencia de escombros u obstrucción del canal en forma artificial. <i>(f7)</i>	10%
Antecedentes	Aluviones declarados en la cuenca hidrográfica. <i>(f8)</i>	15%

Siendo el Índice de susceptibilidad para flujos (IS_F), el indicado en la siguiente expresión:



$$IS_F = \left(\sum_{i=1}^8 f_i \right) \cdot f_9$$

$f_9=1$, cuando el material de la unidad es compatible con mecanismos tipo flujo, o bien si el material es no compatible y las unidades próximas pueden aportar material mediante deslizamientos de suelo.

- Factores máximos considerados en caída de rocas modificado en Muñoz (2013).

Factor	Descripción	Ponderación (%)
Geomorfología	Pendiente promedio de laderas. <i>(f1)</i>	35%
	Altura máxima de la ladera. <i>(f2)</i>	
	Forma. <i>(f3)</i>	
Geología-Geotecnia	Características geológicas-geotécnicas de la unidad. <i>(f4)</i>	20%
	Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalla. <i>(f5)</i>	
Antrópico	Desestabilización artificial de laderas. <i>(f6)</i>	25%
Antecedentes	Caídas de roca declaradas en la unidad. <i>(f7)</i>	10%
Clima y vegetación	Condición de humedad en la ladera. <i>(f8)</i>	10%
	Características y rol de la vegetación. <i>(f9)</i>	

Siendo el Índice de susceptibilidad para caídas de rocas (IS_c), el indicado en la siguiente expresión:

$$IS_c = \left(\sum_{i=1}^9 f_i \right) \cdot f_{10}$$

Cualquier unidad asociada a suelo, tendrá un IS_c nulo ya que f_{10} , valdrá 0.

En las metodologías de (Lara M. , 2007) , y de (Muñoz E., 2013), el Índice de Susceptibilidad (IS), varía entre [0% - 100%], considerando que hay susceptibilidad a remoción en masa cuando $IS \geq 50\%$.

En base a las investigaciones de (Lara M. , 2007), que incluyen otras específicas realizadas por, (Padilla C., 2006), se obtiene el peligro de remoción en masa, analizando previamente diversos factores de amenaza.

Probabilidad Factor Gatillante (PFG)	Grado de Peligro Específico (GPE=GPGxPFG)	Probabilidad de Falla (PF)	Probabilidad de alcance (PA)	Grado de Peligro Global (GPG=PFxPA)
Nulo	Nulo	Alta	Nulo	Alto
Alto	Alto		Alto	
Medio	Alto		Medio	
Bajo	Medio		Bajo	
Nulo	Nulo	Media	Nulo	Medio
Alto	Alto		Alto	
Medio	Medio		Medio	
Bajo	Medio		Bajo	
Nulo	Nulo	Baja	Nulo	Bajo
Alto	Medio		Alto	
Medio	Medio		Medio	
Bajo	Bajo		Bajo	
Nulo, Alto, Medio o Bajo	Nulo	Nula	Nulo, Alto, Medio o Bajo	Nulo

Fuente: (Lara M. , 2007).

Factor crítico por flujo de detritos y factores de amenaza (pendientes y T).

Probabilidad alcance de flujos	Rangos de pendientes (°)	Periodo de retorno cauces de inundación T (años)
Bajo	10° - 13°	100
Media	13° - 15°	50
Alta (*)	≥ 15°	20

(*) En el caso de existir antecedentes de afectación de flujos.

Factor crítico por caída de rocas y factores de amenaza (pendientes de laderas).

Probabilidad alcance caída rocas	Rangos de pendientes de laderas	
	Situación estática	Situación sísmica
Bajo	35° - 40°	30° - 45°
Medio	40° - 45°	35° - 45°
Alto	45° - 50°	40° - 50°

Factor crítico por caída de rocas y factores de condicionantes de amenaza (pendientes de laderas)

Probabilidad Alcance desplazamiento Superficie del Suelo	Rangos de pendiente según ángulo crítico (β)
Bajo	$\beta_{\text{crítico}} - 2^\circ < \beta < \beta_{\text{crítico}} + 2^\circ$
Media	$\beta_{\text{crítico}} + 2^\circ < \beta < \beta_{\text{crítico}} + 4^\circ$
Alta (*)	$\beta_{\text{crítico}} + 2^\circ < \beta < \beta_{\text{crítico}} + 6^\circ$

Probabilidad cualitativa FS=1 e Índice de Susceptibilidad (IS= 50%).

Probabilidad Numérica de Generación de un Factor de Remoción en Masa (FRM)	Probabilidad Cualitativa de Generación de un Factor de Remoción en Masa (FRM)
0% - 25%	Bajo
25% - 50%	Medio
> 50%	Alto

Factores condicionantes de desplazamientos superficiales de suelos (Rangos y pesos), metodología de (Muñoz E., 2013).

Factores condicionantes de deslizamientos de suelo reconocidos en la ladera. (Metodología Muñoz, 2013)			
<i>Factor de amenaza condicionante.</i>	<i>Especificaciones</i>	<i>Rangos</i>	<i>Ponderación (%)</i>
<i>Pendientes de laderas</i>	<i>Promedio de la ladera</i>	15°-20°	1
		20°-25°	2
		25°-30°	3
		30°-35°	8
		35°-40°	10
		> 40°	15
<i>Altura máxima zona</i>	<i>Considerar la altura máxima de la zona (unidad)</i>	0-10 m	1
		10-20 m	2
		20-30 m	3
		30-40 m	4
		> 40 m	5
<i>Exposición al sol</i>	<i>Para el caso de Chile central, alta exposición: laderas mirando al Norte, al estar expuestas al sol durante todo el año. Parcial: laderas mirando al E-W. Baja: laderas mirando al Sur.</i>	alta	10
		parcial	5
		baja	3
<i>Forma</i>	<i>Considerar si la ladera presenta una geometría regular, irregular, recta, cóncava o convexa y ver la influencia que tiene en el tipo de mecanismo analizado. Se evalúa la condición: si es una condición favorable, reduce la susceptibilidad; si es una geometría muy poco favorable, aumenta la susceptibilidad.</i>	muy favorable	0
		favorable	1
		medianamente favorable	4
		poco favorable	7
		muy poco favorable	10
<i>Características geológicas y geotécnicas del material</i>	<i>Considerar la calidad del macizo rocoso, mediante estimación o determinación de Rock Mass Rating (RMR). Rangos utilizan valores de RMR</i>	muy favorable	15
		favorable	12
		medianamente favorable	9
		poco favorable	6
		muy poco favorable	3
<i>Condiciones de humedad y saturación</i>	<i>Considerar: 1. Capacidad de saturación por abajo (profundidad del nivel freático) y por arriba (infiltración por precipitación). 2. Capacidad de almacenaje de agua en la estructura de suelo (asociada a presencia de niveles impermeables). Saturación y mayor almacenaje favorecen generación de deslizamientos. La relación (profundidad del N.F/ espesor del suelo) cercana a 0, indica condiciones muy favorables de generación. ~ 0.5 es favorable</i>	muy favorable	10
		favorable	7
		poco favorable	3
		muy poco favorable	2
<i>Cercanía a una falla y/o zona de cizalla mayor.</i>	<i>Definir si la zona analizada está cerca de la falla mayor</i>	Unidad a más de 100 m de distancia	0
		Unidad a menos de 100 m de distancia	5

		<i>Unidad es atravesada por una falla mayor</i>	10
<i>Desestabilización artificial de laderas.</i>	<i>Obra de estabilización mayor (por ejemplo, muros de hormigón)</i>	<i>Condición muy favorable</i>	-4
	<i>Sistema de bancos y/o soporte robusto</i>	<i>Condición favorable</i>	-2
	<i>unidad no intervenida (ladera natural)</i>	<i>No intervenido</i>	0
	<i>soporte insuficiente o intervención menor</i>	<i>Condición medianamente favorable</i>	2
	<i>Regular desestabilización o intervención</i>	<i>Condición desfavorable</i>	4
	<i>Desestabilización evidente</i>	<i>Condición muy desfavorable</i>	10
<i>Deslizamientos de suelo reconocidos en la ladera.</i>	<i>Ver si existen registros o evidencias de deslizamientos de suelo en la ladera</i>	<i>Presente</i>	10
		<i>Sin antecedentes</i>	4
		<i>No observado</i>	0
<i>Condición de humedad en la ladera.</i>	<i>Considerar humedad de la ladera, profundidad del nivel freático, niveles impermeables, saturación</i>	<i>Evidente</i>	10
		<i>Presente</i>	7
		<i>Posible</i>	3
		<i>Sin antecedentes</i>	0
<i>Presencia de vegetación.</i>	<i>Ver si existe vegetación y si es favorable o no a la ocurrencia del mecanismo</i>	<i>No favorable</i>	4
		<i>Favorable</i>	10
<i>Tipo de material</i>	<i>En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto, pondera por 0 al resto de los factores</i>	<i>Suelo</i>	1
		<i>Roca (cobertura < 1 m de suelo)</i>	0

Factores condicionantes de flujo de detritos (Rangos y pesos), metodología de Muñoz, 2013.

Factores condicionantes de Flujos de detritos. (Metodología Muñoz, 2013)			
<i>Factor de amenaza condicionante.</i>	<i>Especificaciones</i>	<i>Rangos</i>	<i>Ponderación (%)</i>
<i>Pendientes del canal de drenaje</i>	<i>Se usa pendiente promedio de canal de drenaje</i>	<i>< 5°</i>	<i>1</i>
		<i>5°-10°</i>	<i>2</i>
		<i>> 10°</i>	<i>3</i>
<i>Encajamiento canal de drenaje</i>	<i>Geomorfología y relación profundidad/ancho del canal. Alto encajonamiento, alta razón (> 0.7)</i>	<i>bajo</i>	<i>4</i>
		<i>medio</i>	<i>8</i>
		<i>alto</i>	<i>15</i>
<i>Características geológicas y geotécnicas del material</i>	<i>Considerar la calidad del macizo rocoso y grado de meteorización. Considerar espesor de suelo o cubierta de regolito. Se evalúa condición ante posible ocurrencia del mecanismo</i>	<i>muy poco favorable</i>	<i>2</i>
		<i>poco favorable</i>	<i>6</i>
		<i>medianamente favorable</i>	<i>10</i>
		<i>favorable</i>	<i>12</i>
		<i>muy favorable</i>	<i>15</i>
<i>Condiciones de humedad y saturación</i>	<i>Asociado a: (1) Capacidad de saturación Nv. Freático < 2m poco favorable; >2m poco favorable; 2m favorable (2) capacidad de almacenaje de agua en el suelo (3) variaciones estacionales de humedad</i>	<i>sin antecedentes</i>	<i>0</i>
		<i>poco favorable</i>	<i>3</i>
		<i>medianamente favorable</i>	<i>5</i>
		<i>favorable</i>	<i>7</i>
		<i>muy favorable</i>	<i>10</i>
<i>Cercanía a una falla y/o zona de cizalle mayor.</i>	<i>Definir si la zona analizada está cerca de la falla mayor</i>	<i>Unidad a más de 100 m de distancia</i>	<i>1</i>
		<i>Unidad a menos de 100 m de distancia</i>	<i>3</i>
		<i>Unidad es atravesada por una falla mayor</i>	<i>5</i>
<i>Obstrucción canal de drenaje.</i>	<i>Considera si existen obras de contención de flujo (como piscinas decantadoras) u obstrucción del cauce por escombros, basura, troncos u otros.</i>	<i>Sistema de contención de flujos</i>	<i>-5</i>
		<i>no observado</i>	<i>1</i>
		<i>baja obstrucción</i>	<i>5</i>
		<i>moderada obstrucción</i>	<i>7</i>
		<i>importante obstrucción</i>	<i>10</i>
<i>Aluviones declarados en la cuenca hidrográfica</i>	<i>Información escrita y/u observación de depósitos de flujos en la unidad</i>	<i>Sin antecedentes</i>	<i>5</i>
		<i>prehistóricos</i>	<i>10</i>
		<i>históricos frecuentes</i>	<i>15</i>
<i>Presencia de vegetación.</i>	<i>Evaluar si la vegetación en la unidad es favorable o no para detener el mecanismo. Considerar favorable, árboles y arbustos con raíces robustas (que actúen como decantadores</i>	<i>Favorable</i>	<i>5</i>

	<i>naturales). Considerar desfavorable vegetación fácilmente desgarrable.</i>	<i>Desfavorable</i>	<i>10</i>
<i>Tipo de material</i>	<i>Se evalúa si el material de la unidad es compatible con el mecanismo. Si compatible (cauces activos o secos, trazas de quebradas) se multiplica suma de factores ponderados por 1. Si no es compatible, se evalúa si las unidades inmediatamente por sobre la unidad tiene IS de Deslizamientos superficiales de suelo > 50 (multiplicar por 1) o menor que 50 (multiplicar por 0)</i>	<i>Compatible</i>	<i>1</i>
		<i>No compatible y unidades inmediatamente encima tienen IS deslizamiento superficial suelo > 50</i>	<i>1</i>
		<i>No compatible y unidades inmediatamente encima tienen IS deslizamiento superficial suelo < 50 o existen unidades aledañas que aporten material</i>	<i>0</i>

Factores condicionantes de caída de rocas (Rangos y pesos), metodología de Muñoz, 2013.

Factores condicionantes de caídas de roca. (Metodología Muñoz, 2013)			
Factor de amenaza condicionante.	Especificaciones	Rangos	Ponderación (%)
<i>Pendientes promedio de laderas</i>	<i>Considerar la pendiente promedio de la ladera (obtenida del ráster de pendientes) o su valor en caso de tener el dato de terreno</i>	10°-20°	1
		20°-25°	2
		25°-30°	3
		30°-40°	8
		40°-60°	10
		> 60°	15
<i>Altura máxima zona</i>	<i>Considerar la altura máxima de la zona (unidad)</i>	0-5 m	0
		5-10 m	1
		10-15 m	3
		15-20 m	4
		20-30 m	5
		30-50 m	7
		50-100 m	8
		> 100 m	10
<i>Forma</i>	<i>Considerar si la ladera presenta una geometría regular, irregular, recta, cóncava o convexa y ver la influencia que tiene en el tipo de mecanismo analizado. Se evalúa la condición: si es una condición favorable, reduce la susceptibilidad; si es una geometría muy poco favorable, aumenta la susceptibilidad.</i>	<i>muy favorable</i>	0
		<i>favorable</i>	1
		<i>medianamente favorable</i>	4
		<i>poco favorable</i>	7
		<i>muy poco favorable</i>	10
<i>Características geológicas y geotécnicas del material</i>	<i>Considerar la calidad del macizo rocoso, mediante estimación o determinación de Rock Mass Rating (RMR). Rangos utilizan valores de RMR</i>	<i>muy favorable</i>	3
		<i>favorable</i>	6
		<i>medianamente favorable</i>	9
		<i>poco favorable</i>	12
		<i>muy poco favorable</i>	15
<i>Cercanía a una falla y/o zona de cizalla mayor.</i>	<i>Definir si la zona analizada está cerca de la falla mayor</i>	<i>Unidad a más de 100 m de distancia</i>	0
		<i>Unidad a menos de 100 m de distancia</i>	3
		<i>Unidad es atravesada por una falla mayor</i>	5
<i>Desestabilización artificial de laderas.</i>	<i>Obra de estabilización mayor (por ejemplo, muros de hormigón)</i>	<i>Condición muy favorable</i>	-10
	<i>Sistema de bancos y/o soporte robusto</i>	<i>Condición favorable</i>	-2
	<i>unidad no intervenida (ladera natural)</i>	<i>No intervenido</i>	0
	<i>soporte insuficiente o intervención menor</i>	<i>Condición medianamente favorable</i>	15
	<i>Regular desestabilización o intervención</i>	<i>Condición desfavorable</i>	19
	<i>Desestabilización evidente</i>	<i>Condición muy desfavorable</i>	25

<i>Caídas de roca reconocidas de laderas</i>	<i>Ver si existen registros o evidencias de deslizamientos de suelo en la ladera</i>	<i>Presente</i>	<i>10</i>
		<i>Sin antecedentes</i>	<i>4</i>
		<i>No observado</i>	<i>0</i>
<i>Condición de humedad en la ladera.</i>	<i>Considerar humedad de la ladera, profundidad del nivel freático, niveles impermeables, saturación</i>	<i>Presente</i>	<i>5</i>
		<i>No observado</i>	<i>0</i>
<i>Presencia de vegetación.</i>	<i>Ver si existe vegetación y si es favorable o no a la ocurrencia del mecanismo</i>	<i>No favorable</i>	<i>0</i>
		<i>Favorable</i>	<i>5</i>
<i>Tipo de material</i>	<i>En este caso, el material suelo no está en estudio, por lo tanto, pondera por 0 al resto de los factores</i>	<i>Suelo</i>	<i>0</i>
		<i>Roca (cobertura < 1 m de suelo)</i>	<i>1</i>

A.2.2.1.1 Factores de amenaza de remoción en masa

Como se ha indicado a partir de la selección del parámetro crítico de remoción en masa, en ese caso flujo de detritos y deslizamiento superficial del terreno y rocas, se analizan los parámetros de amenaza de remoción en masa propuestos en base al análisis de la información de eventos acaecidos y el potencial de afectación según la localización.

Los factores seleccionados y el peso máximo de afectación estimado en base a las investigaciones analizadas, de cada uno de ellos son los indicados en la Tabla 67.

Tabla 67 Factores de amenaza de Remoción en masa. Valores min-máx. Ponderaciones.

Denominación	Nombre del factor	Valor mín.	Valor máx.	Peso (%)	34,14%
<i>F_{PRM1}</i>	Velocidad de deslizamiento vd (mm/s)	0,00	0,09	0,302	0,083
<i>F_{PRM2}</i>	Intensidad de precipitación I ₂₄ (mm)	0,00	0,15	0,384	0,105
<i>F_{PRM3}</i>	Pendiente del terreno, I (%)	0,00	0,10	0,314	0,086
TOTAL				1,00	0,273

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran los factores de amenaza seleccionados y los valores incrementales (mínimos y máximos), así como sus pesos parciales, porcentaje incremental respecto al valor de la amenaza zonal y su valor total.

Los rangos de amenaza, así como los rangos de los factores de amenaza, y los valores extremos, han sido propuestos en base a las investigaciones existentes consultadas, pudiendo variar según las características geológicas y geográficas de la zona de estudio. En general y según el análisis de numerosos eventos de remoción en masa (flujo de detritos y deslizamientos) acaecidos en la ciudad de Santiago, y diferentes zonas tanto en América como en Europa se constata que los factores más frecuentes en este tipo de amenaza, son la velocidad de deslizamiento al localizarse muchas zonas en piedemonte cordillerano, la intensidad de precipitación agrava sus efectos, así como el la escorrentía generada, ya que la impermeabilidad de terrenos y superficies es elevada, así como carecer de vegetación que contenga el flujo de escorrentía.

Precipitación > Velocidad de deslizamiento > Pendiente del terreno

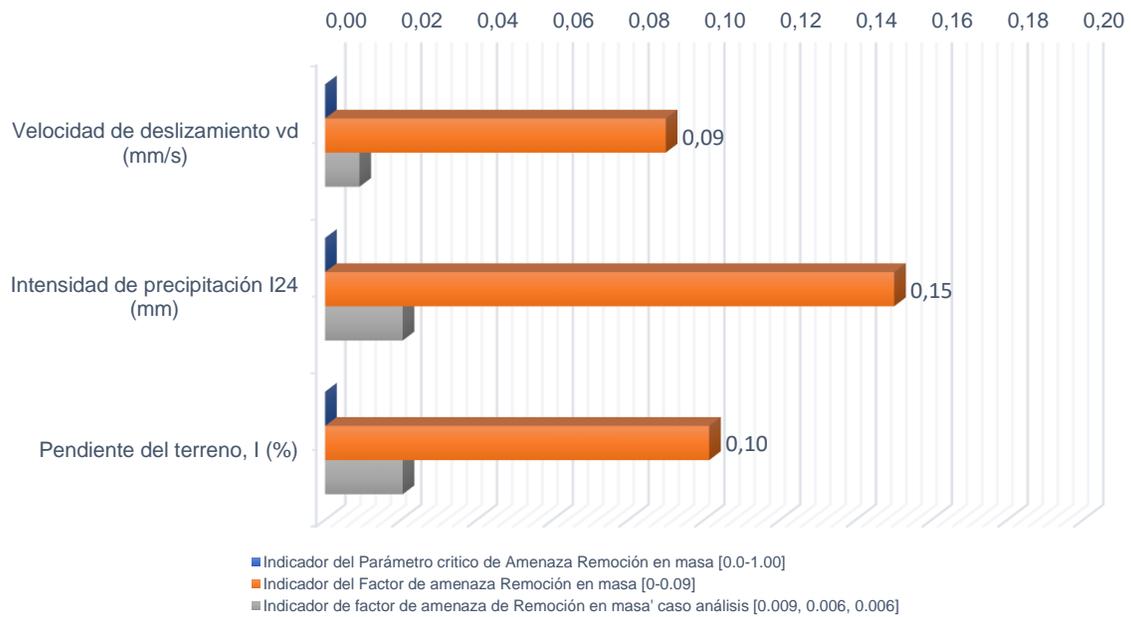


Figura 32 Amenaza de remoción en masa y factores de amenaza. Rangos y valores. Fuente: Elaboración propia.

La amenaza de remoción en masa final, es decir la afectada por los factores de amenaza indicados, vendría dada por la siguiente expresión:

$$A_{RM} = P_{pRM} \cdot \Pi F_{pRM} = P_{pRM} \cdot (F_{pRM1} \cdot F_{pRM2} \cdot F_{pRM3})$$

A.2.2.2. Amenaza Sísmica.

- Riesgo Sísmico Zona Oriente Santiago (Fuente Sismogénica Tipo Cortical).
 La falla San Ramón podría generar sismos de magnitud máxima esperada $M_w=7.4$, y dado dicho valor, se estimaron las aceleraciones horizontales máximas (PGA), considerando el efecto de bloque colgante o hanging wall, en dirección Este. Según la información de la SEREMI-MINVU (2012), la expresión espacial de la Falla de Ramón, el dimensionamiento del riesgo de ruptura superficial y la tipología de los terrenos adyacentes, se verifica la disimetría existente resultando afectados por deformaciones y desnivelaciones fuertes unos 100 m hacia el W y unos 200 m hacia el Este, cuyo efecto se disiparía con el incremento de la distancia.
 Con relación al terreno considerado fue de Tipo II, correspondiente a gravas consolidadas procedentes de los ríos Maipo y Mapocho. Otro aspecto que se consideró fue el efecto de la cuenca de Santiago, con un valor de profundidad promedio de 300 m.
 Mediante la ley de atenuación definida por Campbell & Bozorgnia (2008), y Campbell & Bozorgnia (2003), se obtienen los valores de PGA presentados en la Tabla 68.

Tabla 68 Niveles de riesgo rangos de PGA y distancias epicentrales.

Nivel de riesgo	Rangos PGAH (%g) EAST	Distancia epicentral D_H (km) EAST	Rangos PGAH-WEST (% g)	Distancia epicentral (km) PGAH-WEST
Verde	$26 < \text{PGA} \leq 37$	$14,7 \geq D_H > 11,5$	$\text{PGA} \leq 26$	$5 < D_H \leq 10$
Amarillo	$37 < \text{PGA} \leq 47$	$11,5 < D_H \geq 7,9$	$26 < \text{PGA} \leq 37$	$5 \geq D_H > 2$
Naranja	$58 \geq \text{PGA} > 47$	$7,9 < D_H \geq 2,0$	$37 < \text{PGA} \leq 47$	$D_H \leq 2$
Rojo	$58 < \text{PGA} > 70$	$D_H < 2,0$		

Fuente: estudio "Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón", Informe Etapa 2-ID N° 640-27-LP10, enero 2012. MINVU/SEREMI R.M. pág. 68-69. Aceleraciones sísmicas máximas horizontales y distancias epicentrales (PGAH, y D_H)

Tabla 69 Estados de daño y factores de daño de referencia.

Estado de daño	Factor de daño referencia (%)
Sin daño	0%
Leve	5%
Moderado	20%
Severo Completo	65%
Completo	100%

Fuente: Hwang y Lin (2002)

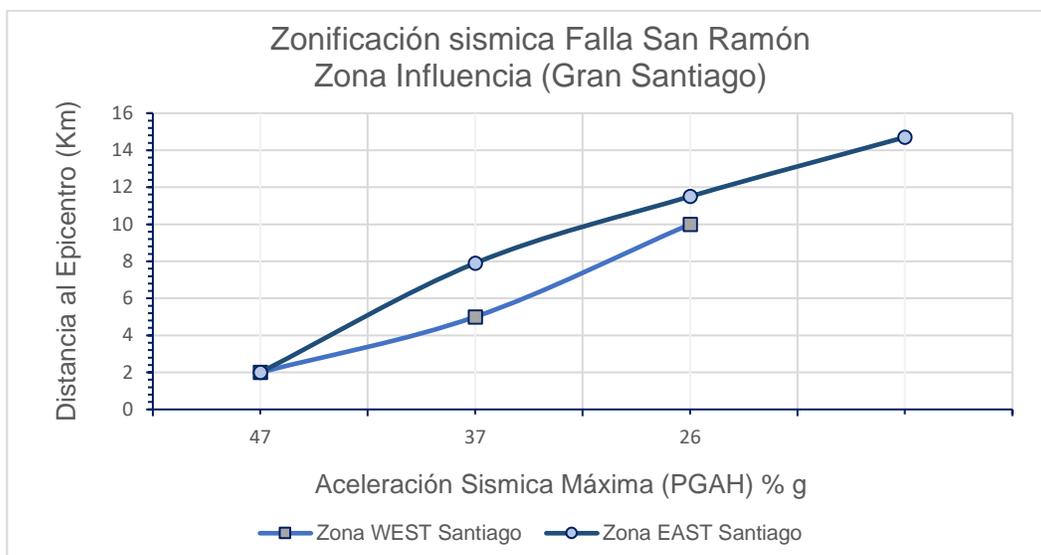


Figura 33 Zonificación sísmica Falla San Ramón. Fuente: elaboración propia.

Tabla 70 Ventanas temporales (T) en función de la magnitud y fuente Sismogénica, y desviación estándar evaluada en el año 1 $\sigma_1 = \lambda/T = 1$ (Stepp, 1971-1972)

Magnitud (Ms)	Fuente Sismogénica Interplaca		Fuente Sismogénica Intraplaca		Fuente Sismogénica Cortical	
	Periodo retorno (T)	σ_1	Periodo retorno (T)	σ_1	Periodo retorno (T)	σ_1
3	16	41	16	37	16	17,7
3,5	16	33	16	25	23	12,1
4	23	21	16	13	23	5,65
4,5	23	11	16	7,7	23	3,03
5	23	5,1	16	3,7	23	1,2
5,5	23	3,2	16	2,15	23	0,78
6	32	1,1	32	1,17	23	0,63
6,5	45	0,61	45	0,67	-	-
7	64	0,43	64	0,36	-	-
7,5	64	0,45	-	-	-	-
8	128	0,23	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 71 Grado de daño medio y vulnerabilidad. Riesgo sísmico.

Vulnerabilidad Sísmica	Grado	Valoración
A	Muy Alta	100-75
B	Alta	75-50
C	Media-Alta	50-25
D	Media-Baja	25-10
E	Baja	10-5
F	Muy Baja	5-0

Fuente: (Lagomarsino S. & Giovinazzi S., 2006)

A.2.2.2.1 Factores de amenaza sísmica

Como se ha indicado a partir de la selección del parámetro crítico sísmico, en ese caso y dadas la peculiaridad sísmica más “dañina”, al ser sismos de tipo cortical de poca profundidad, se consideraría la aceleración sísmica máxima (PGA), se analizan los parámetros de amenaza sísmica propuestos en base al análisis de la información de eventos acaecidos y el potencial de afectación según la localización. Los factores seleccionados y el peso máximo de afectación estimado en base a las investigaciones analizadas, de cada uno de ellos, son los indicados en la Tabla 72.

Tabla 72 Factores de amenaza sísmica. Valores min-máx. Ponderaciones.

Factores de amenaza de Remoción en masa (F_{PRM})					
Denominación	Nombre del factor	Valor mín.	Valor máx.	Peso	44.61%
F_{PSM1}	Resistencia del terreno.	0.00	0.15	0.33	0.12
F_{PSM2}	Potencial de licuefacción de suelos.	0.00	0.19	0.37	0.13
F_{PSM3}	Variabilidad del perfil estratigráfico.	0.00	0.11	0.30	0.11
TOTAL				1.00	0.357

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran los factores de amenaza seleccionados y los valores incrementales (mínimos y máximos), así como sus pesos parciales, porcentaje incremental respecto al valor de la amenaza zonal y su valor total.

Los rangos de amenaza, así como los rangos de los factores de amenaza, y los valores extremos, han sido propuestos en base a las investigaciones existentes consultadas, pudiendo variar según las características geológicas y morfológicas de la zona de estudio. En general y según el análisis de eventos sísmicos en general, y de tipología cortical superficial, relacionados con la Falla San Ramón, acaecidos en la ciudad de Santiago, y otras zonas en Europa como España, Italia, Grecia y Portugal, entre otros países, así como Japón y China, en Asia, se constata que los factores más frecuentes en este tipo de amenaza, son la licuefacción del terreno, la resistencia del terreno dada su naturaleza (grava, arena, limos, arcillas, conglomerados,...), y la variabilidad de estratos así como la potencia del perfil estratigráfico, ya que puede generar anomalías en la frecuencia de transmisión de las ondas sísmicas, incrementando la duración y la intensidad de la sacudida.

Potencial de licuefacción > Resistencia terreno > Variabilidad perfil estratigráfico

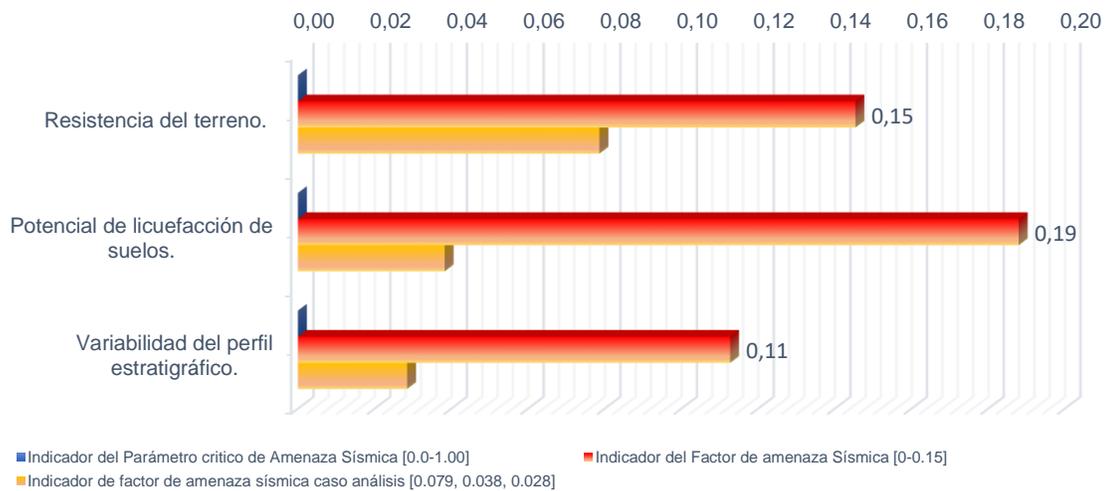


Figura 34 Amenaza Sísmica y factores de amenaza. Rangos y valores. Fuente: Elaboración propia.

La amenaza sísmica final, es decir la afectada por los factores de amenaza indicados, vendría dada por la siguiente expresión:

$$A_{SM} = P_{pSM} \cdot \Pi F_{pSM} = P_{pSM} \cdot (F_{pSM1} \cdot F_{pSM2} \cdot F_{pSM3})$$

A.2.2.3. Amenaza Volcánica.

A.2.2.3.1. Factores de amenaza volcánica

Como se ha indicado a partir de la selección del parámetro crítico volcánico, en ese caso y dadas las características geográficas y de vientos dominantes de la zona, se consideraría la proyección de piroclastos y el flujo lahático, y se analizarían los parámetros de amenaza volcánica propuestos en base al análisis de la información de eventos históricos y el potencial de afectación según la localización. El régimen de vientos en principio descartaría la propagación de ceniza volcánica.

Los factores seleccionados y el peso máximo de afectación estimado en base a las investigaciones analizadas, de cada uno de ellos, son los indicados en la Tabla 73.

Tabla 73 Factores de amenaza volcánica. Valores min-máx. Ponderaciones.

Factores de amenaza volcánica (F_{pv})					
Denominación	Nombre del factor	Valor mín.	Valor máx.	Peso	27.70%
F_{pv1}	Pendiente topográfica	0.00	0.16	0.40	0.03
F_{pv2}	Naturaleza fluvial del terreno.	0.00	0.07	0.31	0.02
F_{pv3}	Cobertura vegetal del terreno	0.00	0.04	0.29	0.02
TOTAL				0.40	0.07

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran los factores de amenaza seleccionados y los valores incrementales (mínimos y máximos), así como sus pesos parciales, porcentaje incremental respecto al valor de la amenaza zonal y su valor total.

Los rangos de amenaza, así como los rangos de los factores de amenaza, y los valores extremos, han sido propuestos en base a las investigaciones existentes consultadas, pudiendo variar según las características geológicas y morfológicas de la zona de estudio. En general y según el análisis de eventos volcánicos, acaecidos en Chile, se constata que los factores más frecuentes en este tipo de amenaza son la pendiente topográfica, la naturaleza fluvial del terreno que favorece los flujos de lahares y la propagación de material volcánico de baja densidad, la cobertura vegetal, entre otros.

Pendiente topográfica > Naturaleza fluvial terreno > Cobertura vegetal

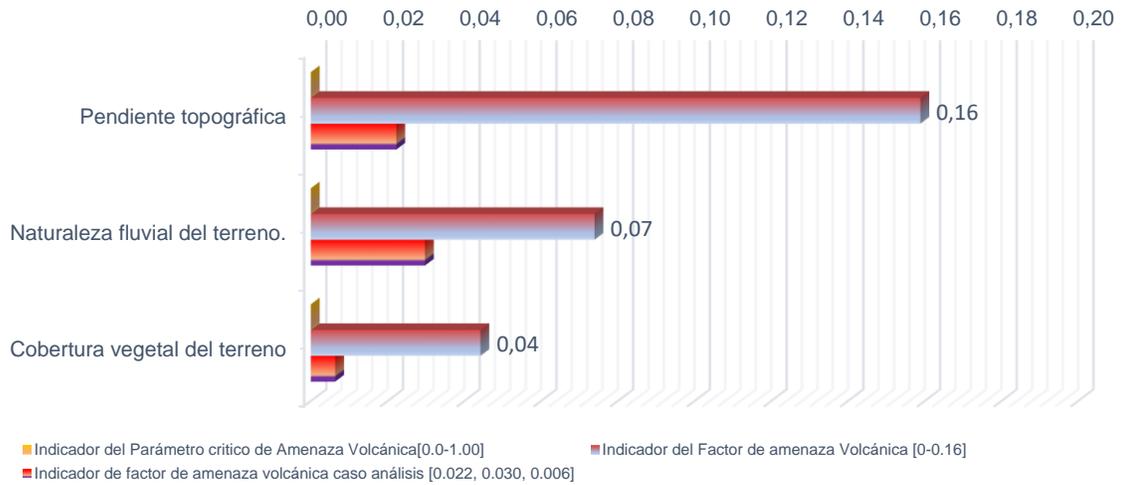


Figura 35 Amenaza volcánica y factores de amenaza. Rangos y valores. Fuente: Elaboración propia.

La amenaza sísmica final, es decir la afectada por los factores de amenaza indicados, vendría dada por la siguiente expresión:

$$A_H = P_{pV} \cdot \Pi F_{pV} = P_{pV} \cdot (F_{pV1} \cdot F_{pV2} \cdot F_{pV3})$$

A continuación, se adjuntan las metodologías de análisis del peligro volcánico, niveles de peligro, y riesgo sísmico, empleadas en esta investigación. (SERNAGEOMIN, Red Nacional de Vigilancia Volcánica de Chile, 2018), (Perez Contreras, 2012).

Metodología NVEWS-SERNAGEOMIN. Chile, 2011

- Evaluación del peligro volcánico según la metodología NVEWS-SERNAGEOMIN. Factores de Peligro.

Denominación volcán	Factores de Peligro															TOTAL
	Tipo de volcán (0-1)	Ocurrencia de Lahares en el Holoceno (0-1)	Ocurrencia de flujos piroclásticos en el Holoceno (0-1)	Ocurrencia de lavas en el Holoceno (0-1)	Actividad explosiva < 500 años (0-1)	Actividad explosiva < 5000 años (0-1)	Máximo IEV (0-3)	Recurrencia eruptiva (0-4)	Ocurrencia de tsunamis en el Holoceno (0-1)	Potencial de explosiones hidrotermales (0-1)	Potencial de colapso de flanco (0-1)	Actividad sísmica (0-1)	Deformación (0-1)	Desgasificación (0-1)	Potencial de generación de Lahares (0-1)	
Maipo	1	0	1	1	0	0	0	4	0	1	0	0	0	0	0	8/20
San José	1	1	0	0	0	0	0	4	0	1	1	1	0	1	0	10/20
Tupungatito	1	0	0	1	0	0	0	4	0	1	0	1	0	1	1	10/20



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Metodología de la Universidad de Bristol (MUB).

- Evaluación del peligro volcánico según la metodología (MUB). Factores de Peligro.

Denominación volcán	Factores de Peligro								TOTAL
	Tipo de volcán	Lago o hielo en cráter	Flujo piroclástico	Peligro de Lahar	Flujo de lava	Sub-características	Máximo IEV	Frecuencia de erupción	
Maipo	1	1	2	0	0,2	0,1	1	3	8,3
San José	1	1	2	2	0,2	0,1	1	2	9,3
Tupungatito	1	1	2	2	0,2	0,1	1	4	11,3

Ranking de Niveles de Peligro. Metodologías (MUB, y NVEWS-SERNAGEOMIN).

Tabla 74 Niveles de peligro. Metodologías MUB. y NVEWS-SERNAGEOMÍN.

Denominación Volcán	Niveles de Peligro
	NVEWS-SERNAGEOMIN
Maipo	40
San José	24
Tupungatito	23

Fuente: (Aguilera Saez, 2016)

Factores de evaluación del peligro volcánico según la metodología de la Universidad de Bristol (MUB).

Factor de Peligro	Rango de Peligro			Rango de Incertidumbre		
	Tupungatito	San José	Maipo	Tupungatito	San José	Maipo
Tipo de volcán	1	1	1	0	0,27	0,13
Lago en el cráter o presencia de capas de hielo o nieve	1	1	1	-	-	-
Flujo piroclástico	2	2	2	0	0,47	0
Peligro de Lahar	2	2	0	0,47	0,47	0
Flujo de lava	0,2	0,2	0,2	0	0	0
N° de Sub-características	0,1	0,1	0,1	-	-	-
Máximo VEI	1	1	1	0	0	0
Frecuencia de la erupción	4	2	3	0	0	0,15
TOTAL	11,3	9,3	8,3	0,47	1,21	0,28

- Distancias y peligro volcánico. Factores.

Distancia respecto al volcán (km)	Amenaza a lahares y coladas de lava	Puntuación
Hasta 5 km	Muy alta	3
De 5 a 10 km	Moderada	2
De 10 km a 20	Baja	1

Fuente: (Pérez Contreras, 2012). SERNAGEOMIN, 2011.

Anexo 3: Indicadores.

A.3.1. Tablas de indicadores de Susceptibilidad. Procedimiento de análisis jerárquico (P.A.J.)

ACUEDUCTO

Tabla 75 Indicadores de Susceptibilidad física (*Isf*) y operacional (*Iso*) de Acueducto.

Denominación	Nombre del indicador	Valor mínimo	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>Isf_{AC1}</i>	Antigüedad (años)/Naturaleza del material	0	0.29	11%	0.6	1	8.38%
<i>Isf_{AC2}</i>	Nº de derivaciones con unión flexible/Longitud tramo (km)	0.1	0.02	29%	0.8	1	15.55%
<i>Isf_{AC3}</i>	Nº cámaras de inspección/Longitud tramo (km)	0.1	0.02	29%	0.8	1	15.55%
<i>Isf_{AC4}</i>	Pendiente hidráulica (m/m)	0.1	0.17	31%	1	1	13.70%
			0.13	100%	0.80		
Denominación	Nombre del indicador	Valor mínimo	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>Iso_{AC1}</i>	Nº reparaciones tramo acueducto/Longitud total acueducto (km)	0	0.25	19%	0.8	1	11.93%
<i>Iso_{AC2}</i>	Km de acueducto inspeccionado al año /Km total de acueducto	0	0.08	25%	0.8	1	10.60%
<i>Iso_{AC3}</i>	Grado de desarrollo de alternativas suministro de agua	0	0.02	28%	0.8	1	8.76%
<i>Iso_{AC4}</i>	Grado de Mantenimiento [C-P]	0	0.02	28%	0.8	1	15.55%
			0.09	100%	0.80		

Fuente: Elaboración propia.

CAPTACIÓN SUPERFICIAL

Tabla 76 Indicadores de Susceptibilidad física (*I_{sf}*) y operacional (*I_{so}*) de Captación Superficial.

Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral minino	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>I_{sfCS1}</i>	Grado de implantación de cuadros eléctricos equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación (%)	0.1	0.1	16%	0.4	1	13.98%
<i>I_{sfCS2}</i>	La antigüedad (años) y tipología constructiva de la instalación (HS-HA)	0	0.2	32%	0.8	1	26.55%
<i>I_{sfCS3}</i>	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería (%)	0.1	0	53%	1	1	23.97%
			0.10	100%	0.73		
Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>I_{soCS1}</i>	Longitud total red alcantarillado (km)/Nº cámaras o pozos de registro	0.1	0.2	50%	0.8	1	19.27%
<i>I_{soCS2}</i>	Longitud red alcantarillado por gravedad (km)/Longitud red Sto.-impulsada (km)	0.1	0.2	50%	0.8	1	16.24%
			0.20	100%	0.80		

Fuente: Elaboración propia.

EMBALSE

Tabla 77 Indicadores de Susceptibilidad física (*I_{sf}*) y operacional (*I_{so}*) de Embalse.

Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral minino	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>I_{sf}</i> _{EMB1}	Antigüedad (años)/Naturaleza del material	0	0.3	50%	0.8	1	19.75%
<i>I_{sf}</i> _{EMB2}	Nº y capacidad de desagüe /Nº y capacidad de desembalse de las compuertas o tomas.	0.1	0.3	50%	0.8	1	29.42%
			0.30	100%	0.80		
Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral minino	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>I_{so}</i> _{EMB1}	Volumen de agua fugada (m3) /Capacidad operativa embalse (Hm3)	0	0.3	50%	0.8	1	27.18%
<i>I_{so}</i> _{EMB2}	Grado de Mantenimiento [C-P]	0	0.3	50%	0.8	1	23.65%
			0.30	100%	0.80		

Fuente: Elaboración propia.

ESTANQUE-DEPÓSITO

Tabla 78 Indicadores de Susceptibilidad física (*I_{sf}*) y operacional (*I_{so}*) de Estanque o Depósito.

Denominación	Nombre del indicador	Valor mínimo	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>I_{sfEST1}</i>	La antigüedad (años) y material o tipología constructiva de la instalación (HS-HA)	0.00	0.20	18%	0.90	1	7.67%
<i>I_{sfEST2}</i>	Tipología de estructura: Superficial, Semienterrado, elevado.	0.70	0.30	16%	0.90	1	17.38%
<i>I_{sfEST3}</i>	Nº de cámaras o vasos (N)	0.10	0.10	13%	0.60	1	13.84%
<i>I_{sfEST4}</i>	Existencia de by-Pass y/o descarga previa de cámaras.	0.00	0.10	11%	0.50	1	15.60%
<i>I_{sfEST5}</i>	Disponibilidad de cámara de cloración.	0.00	0.20	14%	0.75	1	8.87%
<i>I_{sfEST6}</i>	Disponibilidad de elementos de Prevención y Control Sanitario	0.00	0.30	12%	0.75	1	10.45%
<i>I_{sfEST7}</i>	Tipo de instalación según caudal de entrada (m ³ /h).	0.00	0.20	16%	0.80	1	7.49%
			0.14	100%	0.52		
Denominación	Nombre del indicador	Valor mínimo	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>I_{soEST1}</i>	Autonomía (horas)/Caudal suministrado (m ³ /s)	0	0.2	50%	0.8	1	6.58%
<i>I_{soEST2}</i>	Grado de Mantenimiento (C-P)	0.1	0.2	50%	0.8	1	12.12%
			0.20	100%	0.80		

Fuente: Elaboración propia.

PLANTA ELEVADORA DE AGUA POTABLE-ESTACIÓN DE BOMBEO DE AGUA PTABLE

Tabla 79 Indicadores de Susceptibilidad física (*Isf*) y operacional (*Iso*) de Plantas Elevadoras o Estaciones de Bombeo de Agua Potable.

Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>Isf_{PEAP1}</i>	Grado de implantación de cuadros eléctricos equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación (%)	0	0.1	11%	0.4	1	10.35%
<i>Isf_{PEAP2}</i>	La antigüedad (años) y material o tipología constructiva de la instalación (HS-HA)	0	0.2	22%	0.8	1	12.38%
<i>Isf_{PEAP3}</i>	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería (%)	0	0	37%	1	1	12.38%
<i>Isf_{PEAP4}</i>	Clasificación por capacidad de bombeo (l/s): $Q_b \leq 100$, $100 < Q_b < 1000$, $Q_b \geq 1000$.	0	0.1	30%	0.9	1	18.71%
			0.10	100%	0.78		
Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>ISO_{PEAP1}</i>	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Agua producida (m3/s)	0	0.025	36%	0.9	1	17.01%
<i>ISO_{PEAP2}</i>	Grado de Mantenimiento (C-P)	0	0.2	24%	0.8	1	15.36%
<i>ISO_{PEAP3}</i>	Nº y tipología de averías de la instalación (anual) con parada de la instalación.	0.1	0.025	40%	1	1	13.80%
			0.08	100%	0.90		

Fuente: Elaboración propia.

PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE-ESTACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

Tabla 80 Indicadores de Susceptibilidad física (*Isf*) y operacional (*Iso*) de Plantas o Estaciones de Tratamiento de Agua Potable.

Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>Isf_{PTAP1}</i>	Antigüedad (años) y tipología constructiva de la instalación.	0	0.17	15%	0.67	1	7.11%
<i>Isf_{PTAP2}</i>	Infraestructura de entrada y decantación primaria (%)	0	0.11	14%	0.56	1	17.41%
<i>Isf_{PTAP3}</i>	Grado de equipamiento telemando y comunicaciones (%)	0	0.22	7%	0.44	1	15.64%
<i>Isf_{PTAP4}</i>	Grado de equipamiento de cloración. (%)	0	0.11	10%	0.44	1	13.88%
<i>Isf_{PTAP5}</i>	Grado de equipamiento de filtración (%)	0	0.11	27%	1.00	1	12.17%
<i>Isf_{PTAP6}</i>	Capacidad de tratamiento según rango de operación Turbidez (l/s): $Q_t \leq 100$, $100 < Q_t < 1000$, $Q_t \geq 1000$	0	0.11	27%	1.00	1	10.51%
			0.14	100%	0.69		
Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>Iso_{PTAP1}</i>	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Agua producida (m3/s)	0	0.3	23%	0.6	1	8.95%
<i>Iso_{PTAP2}</i>	Grado de Mantenimiento (C-P)	0.1	0.3	38%	0.8	1	7.59%
<i>Iso_{PTAP3}</i>	Nº y tipología de fallas anuales con parada de proceso	0.1	0.3	38%	0.8	1	6.74%
			0.30	100%	0.73		

Fuente: Elaboración propia.

POZO DE CAPTACIÓN

Tabla 81 Indicadores de Susceptibilidad física (*Isf*) y operacional (*Iso*) de Captación Superficial.

Denominación	Nombre del indicador	Valor mínimo	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>Isf_{PC1}</i>	Grado de implantación de cuadros eléctricos equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación (%)	0	0.1	11%	0.4	1	11.73%
<i>Isf_{PC2}</i>	La antigüedad (años) y naturaleza material de la estructura de la instalación (HS-HA).	0	0.2	22%	0.8	1	22.28%
<i>Isf_{PC3}</i>	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería (%)	0	0	37%	1	1	19.57%
<i>Isf_{PC4}</i>	Clasificación por capacidad de bombeo (l/s): $Q_b \leq 100$, $100 < Q_b < 1000$, $Q_b \geq 1000$.	0	0.1	30%	0.9	1	17.83%
			0.1	100%	0.775		
Denominación	Nombre del indicador	Valor mínimo	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>Iso_{PC1}</i>	Grado de Mantenimiento (C-P)	0.1	0.2	50%	0.8	1	15.80%
<i>Iso_{PC2}</i>	Nº y tipología de averías de la instalación (anual) con parada de la instalación.	0.1	0.2	50%	0.8	1	12.78%
			0.20	100%	0.80		

Fuente: Elaboración propia.

RED DE DISTRIBUCIÓN

Tabla 82 Indicadores de Susceptibilidad física (*Isf*) y operacional (*Iso*) de la Red de Distribución.

Denominación	Nombre del indicador	Valor mínimo	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>Isf_{RD1}</i>	Antigüedad (años)/Naturaleza del material	0	0.3	23%	0.6	1	11.50%
<i>Isf_{RD2}</i>	N° de conexiones con unión flexible/N° cámaras de inspección	0	0.3	38%	0.8	1	22.06%
<i>Isf_{RD3}</i>	N° válvulas telemandadas/N° total de válvulas de corte.	0	0.3	38%	0.8	1	19.82%
			0.30	100%	0.73		
Denominación	Nombre del indicador	Valor mínimo	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>Iso_{RD1}</i>	N° de roturas no provocadas(año)/Longitud de red de distribución (km)	0	0.04	72%	1.00	1	17.67%
<i>Iso_{RD2}</i>	Grado de Mantenimiento (I-VI)	0.1	0.29	16%	0.50	1	13.59%
<i>Iso_{RD3}</i>	N° de válvulas de corte/N° arranques domiciliarios.	0	0.17	13%	0.33	1	15.35%
			0.17	100%	0.61		

Fuente: Elaboración propia.

RED DE TRANSPORTE

Tabla 83 Indicadores de Susceptibilidad física (*I_{sf}*) y operacional (*I_{so}*) de la Red de Transporte.

Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>I_{sfRT1}</i>	Antigüedad (años)/Naturaleza del material	0	0.17	56%	1.00	1	19.75%
<i>I_{sfRT2}</i>	N° de derivaciones con unión flexible/N° cámaras de inspección	0	0.00	44%	0.67	1	29.42%
			0.08	100%	0.83		
Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>I_{soRT1}</i>	N° reparaciones /Longitud total de red de transporte (km)	0	0.10	56%	0.90	1	27.18%
<i>I_{soRT2}</i>	Grado de Mantenimiento [C-P]	0	0.20	44%	0.83	1	23.65%
			0.15	100%	0.87		

Fuente: Elaboración propia.

PLANTA ELEVADORA DE AGUAS SERVIDAS-ESTACIÓN DE BOMBEO DE AGUAS RESIDIALES

Tabla 84 Indicadores de Susceptibilidad física (*I_{sf}*) y operacional (*I_{so}*) de Plantas o Estaciones Elevadoras o de Bombeo de Aguas Servidas.

Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>I_{sf}PEAS1</i>	Grado de implantación de cuadros eléctricos de equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación.	0	0.1	11%	0.4	1	9.72%
<i>I_{sf}PEAS2</i>	La antigüedad (años) y tipología constructiva de la instalación (HS-HA)	0	0.2	22%	0.8	1	17.55%
<i>I_{sf}PEAS3</i>	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería.	0	0	37%	1	1	11.96%
<i>I_{sf}PEAS4</i>	Clasificación por capacidad de bombeo (l/s): $Q_b \leq 100$, $100 < Q_b < 1000$, $Q_b \geq 1000$.	0	0.1	30%	0.9	1	19.61%
			0.08	100%	0.62		
Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>I_{SO}PEAS1</i>	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Agua elevada (m3/s)	0	0.2	33%	0.8	1	13.66%
<i>I_{SO}PEAS2</i>	Grado de Mantenimiento (C-P)	0	0.2	33%	0.8	1	15.55%
<i>I_{SO}PEAS3</i>	Nº y tipología de averías de la instalación (anual)	0	0.2	33%	0.8	1	11.96%
			0.20	100%	0.80		

Fuente: Elaboración propia.

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS-PLANTA DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES

Tabla 85 Indicadores de Susceptibilidad física (*Isf*) y operacional (*Iso*) de Plantas de Tratamiento o Depuradoras de Aguas Servidas o Residuales.

Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>IsfPTAS1</i>	Antigüedad (años) y tipología constructiva de la instalación.	0	0.2	20%	0.8	1	7.86%
<i>IsfPTAS2</i>	Grado de equipamiento telemando y comunicaciones (%)	0	0.2	20%	0.8	1	19.23%
<i>IsfPTAS3</i>	Grado de implantación de equipamiento electromecánico. (%)	0	0.2	20%	0.8	1	17.06%
<i>IsfPTAS4</i>	Grado de equipamiento cloración y equipamiento de desinfección. (%)	0	0.2	20%	0.8	1	14.92%
<i>IsfPTAS5</i>	Clasificación por capacidad de tratamiento Qt (l/s) (Pequeña, Mediana, Grande).	0	0.2	20%	0.8	1	12.85%
			0.13	100%	0.67		
Denominación	Nombre del indicador	Valor minino	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>ISOPTAS1</i>	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Agua producida (m3/s)	0	0.3	23%	0.6	1	10.90%
<i>ISOPTAS2</i>	Grado de Mantenimiento (C-P)	0	0.3	38%	0.8	1	9.17%
<i>ISOPTAS3</i>	Nº y tipología de fallas anuales	0	0.3	38%	0.8	1	8.01%
			0.30	100%	0.73		

Fuente: Elaboración propia.

RED DE AGUAS SERVIDAS-RED DE SANEAMIENTO O ALCANTARILLADO

Tabla 86 Indicadores de Susceptibilidad física (*Isf*) y operacional (*Iso*) de la Red de Saneamiento.

Denominación	Nombre del indicador	Valor mínimo	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>Isf_{RAS1}</i>	Longitud total red alcantarillado (km)/Nº cámaras o pozos de registro	0	0.05	14%	0.25	1	3.92%
<i>Isf_{RAS2}</i>	Longitud red alcantarillado por gravedad (km)/Longitud red alcantarillado-impulsada (km)	0	0.05	12%	0.23	1	10.38%
<i>Isf_{RAS3}</i>	Antigüedad de la red de alcantarillado (años) y naturaleza material.	0	0.05	12%	0.23	1	4.24%
<i>Isf_{RAS4}</i>	Longitud (km) red alcantarillado no visitable inspeccionada deteriorada/Longitud total red de alcantarillado no visitable inspeccionada (km)	0	0.09	25%	0.45	1	7.25%
<i>Isf_{RAS5}</i>	Longitud total red de alcantarillado (km)/Nº infiltraciones de agua en tubería red de alcantarillado (anual)	0	0.45	37%	1.00	1	7.25%
			0.14	100%	0.43		
Denominación	Nombre del indicador	Valor mínimo	Valor umbral mínimo	Tramo Peso Indicador	Valor umbral máximo	Valor Máximo	PAJ
<i>ISO_{RAS1}</i>	Nº de roturas no provocadas (año)/Longitud de red de alcantarillado (km)	0.1	0.10	18%	0.90	1	7.25%
<i>ISO_{RAS2}</i>	Grado de Mantenimiento [I-V]	0.05	0.20	16%	0.90	1	19.93%
<i>ISO_{RAS3}</i>	Longitud red de alcantarillado renovada, material, km/año	0.1	0.30	11%	0.80	1	11.36%
<i>ISO_{RAS4}</i>	Longitud red de alcantarillado inspeccionada, material (km/año) /Longitud total red (km).	0.1	0.20	16%	0.90	1	7.25%
<i>ISO_{RAS5}</i>	Ton. Lodos extraídos de la red de alcantarillado al año/Longitud de red alcantarillado (km).	0.1	0.10	18%	0.90	1	7.25%
<i>ISO_{RAS6}</i>	Nº de cámaras o pozos de alcantarillado limpiados/Nº total de cámaras o pozos de alcantarillado	0.1	0.30	9%	0.70	1	7.25%
<i>ISO_{RAS7}</i>	Nº clientes afectados por obstrucciones-año/ Nº total de clientes.	0.1	0.10	13%	0.70	1	6.66%
			0.19	100%	0.83		

Fuente: Elaboración propia.

A.3.2. Procedimiento de análisis jerárquico (P.A.J.)

A.3.2.1. Fundamentos y Metodología.

Los fundamentos teóricos que inspiraron la propuesta metodológica de una toma de decisiones multicriterio estimada, denominada por el profesor Thomas L. Saaty (Saaty, 1977, 1980), como Proceso Analítico Jerárquico (The Analytic Hierarchy Process), parte del análisis de alternativas y propuestas, donde se plantean una serie de relaciones lógicas y de conexiones causales que permiten elaborar criterios homogéneos de decisión a seguir para formular la criticidad o relevancia de dichas alternativas, fijando las valoraciones de dichas relaciones.

Los juicios expertos, con sus valoraciones y prioridades, pueden variar según diferentes enfoques y planteamientos, por lo que es necesario dotar de un carácter objetivo y universal los criterios analizados, base de las decisiones a adoptar (adaptada de Saaty (1994).

El Proceso Analítico Jerárquico es una teoría general sobre juicios y valoraciones que, basada en escalas de razón, permite combinar lo científico y racional con lo intangible para ayudar a sintetizar las opiniones expertas, con la naturaleza humana. Dicho análisis basado en comparaciones relativas o ratios permite clasificar cualitativa y cuantitativamente los diferentes aspectos que se requieren medir, a través de escalas de razón.

El proceso de comparaciones pareadas no consiste en asignar números para ordenar las alternativas, sino en derivar un número de las comparaciones entre intangibles homogéneas basadas en su proximidad como si no hubiera modo de conceptualizar magnitudes.

Es mediante el Proceso Analítico Jerárquico que se permite llevar un problema multidimensional (multicriterio) a un problema en una escala unidimensional (escala de prioridades) en la que se representan las salidas globales. La síntesis de las escalas derivadas en el modelo jerárquico sólo se puede efectuar correctamente (Saaty, 1994), para obtener salidas válidas en escalas conocidas mediante la adición ponderada. En estructuras jerárquicas, estas sumas ponderadas llevan a formas multilineales y por tanto no lineales.

Características del Procedimiento de Análisis Jerárquico (AHP):

- 1.-Utiliza jerarquías para formalizar el modelo mental en el modelo estructural asociado. La utilización de jerarquías y redes es algo inherente a las neuronas del cerebro (descomponer un problema complejo en partes más sencillas).
- 2.- Utiliza conglomerados para integrar lo muy pequeño con lo muy grande. (Miller, 1956).
- 3.- Emplea comparaciones pareadas al incorporar las preferencias de los actores entre elementos. Esta forma de incorporar las preferencias (medidas relativas), necesaria al trabajar con aspectos intangibles,

ha sido extendida al caso de los tangibles. Evidentemente, conforme a la inclusión de juicios seguidos, la matriz de comparaciones pareadas es recíproca.

- 4.- Utiliza la escala fundamental propuesta por Saaty {1, 3, 5, 7,9} para incorporar los juicios o valoraciones realizadas. Esta escala, positiva, permite eliminar ambigüedades al comparar elementos en la proximidad del cero o del infinito.
- 5.- Saaty (1980), utiliza el método del auto vector principal por la derecha para obtener las prioridades locales; el principio de composición jerárquico para calcular las prioridades globales y una forma lineal multiaditiva para obtener las prioridades totales. Además, a diferencia de otras técnicas multicriterio, AHP permite, dentro del propio proceso de resolución, evaluar analíticamente la consistencia del decisor a la hora de emitir los juicios.
- 6.- Las prioridades derivadas vienen dadas en una escala de razón (Saaty 1994). En este caso, están permitidas las multiplicaciones y las adiciones cuando los elementos pertenecen a la misma escala, como sucede con las prioridades. Ya que como el cociente de dos números medidos en una escala de razón es un número absoluto, las escalas de razón normalizadas correspondientes a las prioridades de los elementos comparados, obtenidas según AHP, dan lugar a unos valores (números) que reflejan la prioridad entre elementos en una escala absoluta, para la que tiene sentido la ponderación (multiplicación) por otros números y la adición.

Metodología



El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) cuya contribución es importante en niveles operativos, tácticos y estratégicos, permite mejorar la eficiencia, la eficacia y sobre todo la efectividad del sistema, siendo sus características principales, las siguientes:

- 1.- Es una técnica que permite la resolución de problemas multicriterio, multientorno y multifactores, incorporando en el modelo los aspectos tangibles e intangibles, así como el subjetivismo y la incertidumbre inherente en el proceso de toma de decisiones.
- 2) Una teoría matemática de la medida generalmente aplicada a la dominación (directa e indirecta) de la influencia entre alternativas respecto a un criterio o atributo.
- 3) una filosofía para abordar, en general, la toma de decisiones.

Las etapas de la metodología de AHP propuestas en la formulación inicial (Saaty, 1980) es la que se indica a continuación:

ETAPA 1: Modelización.

Se construye un modelo o estructura en la que queden representadas todas las características o aspectos considerados relevantes en el proceso de resolución (actores, escenarios, factores, elementos e interdependencias).

Inicialmente se propusieron (formulación inicial), cuatro axiomas (reciprocidad, homogeneidad, jerarquías y sistemas con dependencias, y expectativas) utilizando como estructura para modelizar el problema una jerarquía, en la que los elementos de un nivel no dependían de los descendientes ni de los hermanos. En el nivel superior de la jerarquía (nivel 0) se coloca la meta global o misión considerada para el problema, y en los sucesivos niveles (1, 2,3...) los demás aspectos relevantes. En el caso más sencillo de jerarquía (sólo dos niveles adicionales), se incluyen en el siguiente nivel (nivel 1) los criterios considerados, y en el último (nivel 2) las alternativas. Evidentemente este modelo simplificado puede completarse tanto como sea preciso para conseguir una representación real del problema. La jerarquía resultante debe ser completa, representativa (incluye aspectos relevantes), no redundante, y minimal (no incluye aspectos irrelevantes). Esta forma de modelizar el problema incluye todos los aspectos relevantes en una única jerarquía.

Si se dispone de suficiente información sobre un problema, es posible descomponer la jerarquía inicial en otras más detalladas o precisas (Saaty, 1994), una para los *beneficios*, otra para los *costes*, una tercera para los *riesgos* y, una última, para las *oportunidades*. Si se consideran las dependencias entre los diferentes elementos, factores y actores incluidos en el modelo, se debe recurrir a una modelización más general que la jerarquía, la red, que suele resolverse utilizando la técnica denominada “supermatrix” (Saaty, 1996).

En general, la modelización estructural del problema puede efectuarse en tres bloques. El superior, modelizado mediante una red, recogería la parte “menos estructurada” y desconocida del problema, incluyendo los escenarios y actores, así como sus interdependencias. El bloque intermedio, modelizado mediante una jerarquía, recogería la parte “semiestructurada” del problema, incluyendo los atributos relevantes organizados en diferentes niveles de criterios. Por último, la parte inferior del modelo estructural, modelizada mediante una jerarquía (medidas relativas) o una tabla de valoraciones (medidas absolutas), recoge la parte “más estructurada” del problema.

En la práctica, suele ser una tabla de efectos correspondientes a las valoraciones de las alternativas respecto a los atributos del problema según una serie de indicadores, previamente fijados.

ETAPA 2: Valoración.

Incorpora las preferencias y deseos de los actores mediante los juicios incluidos en las denominadas matrices de comparaciones pareadas. Estas matrices cuadradas $A = (a_{ij})$ reflejan la dominación relativa (de la alternativa i sobre la j), respecto a un atributo o propiedad en común.

Cuando se dispone de una unidad de medida, o escala, para evaluar la característica considerada (aspecto tangible), se suele tomar la citada unidad y establecer el número de veces que el objeto o elemento en

cuestión la contiene. En este caso las prioridades w_i de las alternativas respecto al atributo se obtienen directamente. Si no se dispone de escala para la característica considerada (aspecto intangible), se recurre a procedimientos relativos, para obtener las prioridades, comparando los elementos entre sí de manera pareada.

En la práctica, se toma como referencia el elemento comparado que posee en menor medida o grado la característica en estudio, y se da una medida de las veces que “el mayor” incluye, recoge, domina, es más preferido, o es más verosímil que el “menor” respecto al atributo estudiado.

Para el tratamiento conjunto (medida de escalas tangibles e intangibles) se consideran todos los aspectos como si fueran intangibles, recurriendo a las comparaciones pareadas para derivar las prioridades relativas. Cuando se dispone de una escala (aspecto tangible), se toman como juicios las razones entre las mediciones, en cambio, si no se dispone de una escala (aspecto intangible), se usan como juicio los correspondientes a las comparaciones pareadas entre los elementos considerados.

Saaty (1980), como ya se ha mencionado, propone la utilización de una escala fundamental para establecer los valores (juicios) correspondientes a las citadas comparaciones. Se considera un rango de valores entre 1/9 y 9 evitando así el problema que se plantea cuando se realizan comparaciones relativas, o si se prefiere razones, entre elementos con valores que van de cero a infinito como en la formulación matemática habitual.

Para lograr la exactitud de medida del proceso empleado, los elementos comparados deben pertenecer a grupos homogéneos o relativamente próximos.

Si los elementos tomados para efectuar sus comparaciones relativas están dispersos o separados respecto al atributo en cuestión, habrá que formar conglomerados engarzados por algún elemento común. De la misma forma, si el conjunto de alternativas que se están comparando respecto a un nodo común es elevado (superior al valor 9 del número mágico de Miller), será preciso recurrir a medidas absolutas (ratings) o separar el total, de alternativas en grupos más pequeños (menos de 9 elementos).

En estos casos (Escobar y Moreno, 1997), se suelen “agrupar” las alternativas en sentido creciente en cuanto a la posesión del atributo, incluyendo un elemento común entre dos grupos consecutivos, que sirva de “pívot” para poder normalizar todas las prioridades locales en una única escala (benchmarking).

En el caso de problemas de gran tamaño en los que es preciso incluir un número elevado de juicios en las matrices de comparaciones pareadas, o cuando no se dispone de todos los juicios considerados inicialmente en las comparaciones pareadas $[n(n-1)/2]$, se recurre a procedimientos aproximados para obtener las prioridades locales.

Estos procedimientos estiman los juicios inexistentes de diferentes maneras (Harker, 1987; Monsuur 1996; Escobar y Moreno, 1997). Aunque las prioridades locales derivadas de una matriz recíproca de comparaciones pareadas (supuesto n elementos), se pueden obtener a partir de $(n-1)$ juicios, los valores así calculados serán solo aproximaciones. La escala fundamental para representar las intensidades de los juicios es la siguiente:

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	Fuertemente más importante un elemento que en otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro,	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

Los valores 2, 4, 6 y 8 suelen utilizarse en situaciones intermedias, y las cifras decimales en estudios de gran precisión, cuando pequeñas modificaciones en los juicios llevan a pequeñas modificaciones en la escala de razón derivada.

El origen “psicológico” de la escala fundamental propuesta por Saaty se encuentra en los trabajos de Weber y Fechner.

La ley de Weber (1846) establece que para poder percibir una modificación o cambio (Δs) en cualquier estímulo (s), es preciso que éste supere un porcentaje del valor inicial (just noticeable difference). Esta ley es cierta cuando la variación es pequeña respecto al valor del estímulo, pero suele fallar cuando el estímulo es muy grande o muy pequeño.

En 1860 Fechner, basándose en la ley de Weber, sugiere una relación geométrica para los incrementos sucesivos en los estímulos: $s_n = s_0 \cdot \alpha^n = s_0(1 + r)^n = s_0(1 + (\frac{\Delta s}{s}))^n$, y una relación aritmética para las sensaciones.

Si M indica la sensación y s el estímulo, la ley de Weber-Fechner viene dada como: $M = a \cdot \log s + b$, $a \neq 0$. Trasladando estas ideas a las comparaciones pareadas ($b=0$ con lo que $s_0 = 1$) las sensaciones asociadas a los nuevos estímulos ($s_0 = 1, s_1 = \alpha, s_2 = s_0\alpha^2, \dots$) son: $M_0 = 0, M_1 = a \log \alpha, M_2 = 2a \log \alpha, M_n = na \log \alpha$. Así, mientras que la razón del estímulo crece geométricamente, la respuesta al estímulo crece aritméticamente. Dividiendo las respuestas M_i por M_1 , se obtiene la secuencia de números absolutos 1,2, 3,...de la escala fundamental (1-9).

El origen “pragmático” incluye entre otras consideraciones: el hecho de eliminar el cero y el infinito en el proceso de cálculo y la adecuación de esos dígitos. Por otra parte, los valores {1, 3, 5, 7,9} pueden considerarse como las marcas de clase de los intervalos (0,2], (2,4], (4,6], (6,8] y (8,10].

Además de la justificación teórica de la escala fundamental, la efectividad de esta escala ha sido validada empíricamente aplicándola a diferentes situaciones reales con aspectos tangibles (superficie de figuras, intensidades de luz, distancias entre ciudades) para las que se ha comportado adecuadamente.

El resultado de las comparaciones pareadas es una matriz cuadrada, $A = (a_{ij})$ positiva y recíproca ($a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$)¹¹, cuyos elementos, a_{ij} , son una estimación de las verdaderas razones w_i/w_j entre las prioridades asociadas a los elementos comparados ($w_j, j = 1, \dots, n$).

ETAPA 3: Priorización y Síntesis.

Esta etapa proporciona las diferentes prioridades consideradas en la resolución del problema: prioridades locales; prioridades globales y prioridades totales. En general, se entiende por prioridad una unidad abstracta válida para cualquier escala en la que se integran las preferencias que el individuo tiene al comparar aspectos tangibles e intangibles.

Las prioridades locales, esto es, las prioridades de los elementos que cuelgan de un nodo común están medidas en escalas de razón de las magnitudes relativas, y se obtienen a partir de la matriz recíproca de comparaciones pareadas. El procedimiento matemático seguido en su obtención es el método del autovector principal por la derecha (Saaty, 1980). Este método, basado en el teorema de Perron-Frobenius, proporciona las prioridades locales resolviendo el sistema de ecuaciones: $Aw = \lambda_{\max} w$, con $\sum_j w_j = 1$, donde $A = (a_{ij})$ es la matriz recíproca de comparaciones pareadas, λ_{\max} el autovalor principal de A , y $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ el vector de prioridades locales medidas en escala de razón y el denominado modo distributivo ($\sum_j w_j = 1$)¹².

En la práctica, la solución $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ se obtiene (método de las potencias) elevando la matriz de juicios a una potencia suficientemente grande, sumando por filas y normalizando estos valores mediante la división de la suma de cada fila por la suma total. El proceso concluye cuando la diferencia entre dos potencias consecutivas sea pequeña.

Un segundo método de priorización (Aguaron y Moreno-Jiménez, 2000), ampliamente utilizado en los últimos años por sus propiedades calculistas, es el de la normalización (modo distributivo) de la media geométrica por filas (la raíz n -ésima del producto de los elementos de la fila). Este valor coincide con el obtenido por el método de Saaty (auto vector principal por la derecha) cuando $n \leq 3$, y da valores aproximados para cualquier otro valor de $n > 3$. Otros métodos (elementales) usados esporádicamente para obtener una solución aproximada son: el del promedio por filas de los elementos normalizados de cada columna de la matriz y la normalización de la suma de los elementos de cada fila. Cuando se dispone de una escala, las prioridades relativas de los elementos que cuelgan de un nodo son conocidas directamente. En este caso, la matriz recíproca de comparaciones pareadas, $W = (w_i/w_j)$, queda como:

$$\begin{bmatrix} W_1/W_1 & \dots & W_1/W_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_n/W_1 & \dots & W_n/W_n \end{bmatrix}$$

El auto vector se reduce a $W_w = nw$ con $\sum_j w_j = 1$.

Conociendo el valor exacto de w o su estimación en forma normalizada, se puede obtener $\lambda_{\text{máx.}}$ mediante la suma de las columnas de A y multiplicando el vector resultante por el vector de prioridades w . En general, utilizando el teorema de Perron-Frobenius, se puede verificar que $\lambda_{\text{máx.}} \geq n$ para el método de Saaty (Saaty, 1980).

Una de las grandes ventajas del Proceso Analítico Jerárquico es que permite relajar las hipótesis tan restrictivas que imponía el enfoque tradicional en decisión, ya que no exige la transitividad en las preferencias. Además, permite evaluar el grado de consistencia del decisor a la hora de introducir los juicios en las matrices recíprocas de comparaciones pareadas.

En el procedimiento de análisis jerárquico AHP, hay consistencia, si la matriz de comparaciones pareadas lo es, cuando se verifica que $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$, $\forall i, j, k$.

Para evaluar la consistencia del decisor se calcula la denominada razón de consistencia (RC), un índice no estadístico (en su propuesta inicial) definida como el cociente entre el índice de consistencia (IC) y el índice de consistencia aleatorio (ICA), es decir:

$$RC = IC / ICA(n), \text{ donde,}$$

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx.}} - n}{n - 1} = \frac{1}{n(n - 1)} \sum_{i \neq j}^n (e_{ij} - 1)$$

Siendo,

$e_{ij} = a_{ij} \cdot w_j / w_i$ y el ICA que es el índice de consistencia al simular de forma aleatoria los juicios para las matrices recíprocas de orden n .

Los valores obtenidos del Índice de Consistencia Aleatorio para los diferentes n , corresponden a una simulación de 100.000 matrices (Aguarón y Moreno-Jiménez, 2001).

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ICA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

En la práctica razones de consistencia inferiores a $10\%^{13}$ se aceptan como válidas, y rechazándose aquellas que la superan, debiendo revisar los juicios, corrigiendo aquél que más se separa de la razón dada por las prioridades relativas correspondientes.

Las prioridades locales obtenidas resolviendo el problema del auto vector en cada uno de los nodos considerados en el problema, son transformadas en prioridades globales, esto es, conocida la importancia relativa, prioridad o peso de los elementos de un nivel respecto al atributo en común que sirve para compararlo, interesa determinar la importancia de esos elementos respecto a la meta global o *misión fijada* para el problema. La forma de transformar esas prioridades locales en globales consiste en aplicar el principio de composición jerárquica.

Si denota por $w_i(k)$ la prioridad local del elemento i en el nivel k , su prioridad global vendrá dada como $w_i(1) = w_i(k) \cdot w\left(\frac{k}{k-1}\right) \cdot w\left(\frac{k-1}{k-2}\right) \dots \dots w\left(\frac{2}{1}\right)$, siendo $w\left(\frac{j}{j-1}\right)$ la prioridad local del elemento del nivel j considerado respecto al nodo del nivel $j-1$ usado para las comparaciones.

El proceso de cálculo termina obteniendo para cada alternativa comparada en el problema su prioridad final en el mismo. Para obtener la prioridad final o total de una alternativa se agregan las prioridades globales obtenidas para esa alternativa. El método habitualmente empleado en AHP para la agregación es el aditivo.



A.3.2.2. Aplicación.

La aplicación del PAJ o su denominación en inglés AHP, se ha realizado a los diferentes componentes de la Infraestructura hidráulica urbana, considerando una ponderación inicial en base a un análisis experto, que con un planteamiento analítico lógico considera una componente subjetiva, y diverge según las características físicas, operativas y zonales del Sistema de Infraestructuras a analizar.

Las fases preliminares para la aplicación del PAJ, son las que se indican a continuación:

- Selección de variables y parámetros representativos.
- Construcción de indicadores.
- Asignación de valores máximos y mínimos (rangos).
- Análisis de indicadores y asignación de valores umbrales (mínimo y máximo), según las características operacionales y de gestión de del Sistema de Infraestructuras hidráulicas urbanas (a determinar).
- Asignación de puntuación y ponderación de indicadores.



□ ACUEDUCTO (AC)

Tabla 87 Caracterización de Acueducto. Aplicación de PAJ

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{sfAC} PAJ
Isf_{AC1}	Antigüedad (años)/Naturaleza del material	0	0,29	11%	0,6	1	8,38%
Isf_{AC2}	Nº de derivaciones con unión flexible/Longitud tramo (km)	0,1	0,02	29%	0,8	1	15,55%
Isf_{AC3}	Nº cámaras de inspección/Longitud tramo (km)	0,1	0,02	29%	0,8	1	15,55%
Isf_{AC4}	Pendiente hidráulica (m/m)	0,1	0,17	31%	1	1	13,70%

Iso_{AC1}	Nº reparaciones tramo acueducto/Longitud total acueducto (km)	0	0,25	19%	0,8	1	11,93%
Iso_{AC2}	Km de acueducto inspeccionado al año /Km total de acueducto	0	0,08	25%	0,8	1	10,60%
Iso_{AC3}	Grado de desarrollo de alternativas suministro de agua	0	0,02	28%	0,8	1	8,76%
Iso_{AC4}	Grado de Mantenimiento [C-P]	0	0,02	28%	0,8	1	15,55%

Fuente: Elaboración propia.

ACUEDUCTO	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8
Asignación Escala Saaty	9	7	7	6	5	4	3	7
Valores asignados Homogeneizados	1,00	0,78	0,78	0,67	0,56	0,44	0,33	0,78

$n = 8$ (n° de indicadores)

Matriz de Comparación.

	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8
AC1	1,0000	0,7778	0,7778	0,6667	0,5556	0,4444	0,3333	0,7778
AC2	1,2857	1,0000	1,0000	1,1667	1,4000	1,7500	2,3333	1,0000
AC3	1,2857	1,0000	1,0000	1,1667	1,4000	1,7500	2,3333	1,0000
AC4	1,5000	0,8571	0,8571	1,0000	1,2000	1,5000	2,0000	0,8571
AC5	1,8000	0,7143	0,7143	0,8333	1,0000	1,2500	1,6667	0,7143
AC6	2,2500	0,5714	0,5714	0,6667	0,8000	1,0000	1,6667	0,5714
AC7	3,0000	0,4286	0,4286	0,5000	0,6000	0,6000	1,0000	0,4286
AC8	1,2857	1,0000	1,0000	1,1667	1,4000	1,7500	2,3333	1,0000
Suma	13,4071	6,3492	6,3492	7,1667	8,3556	10,0444	13,6667	6,3492

Matriz Normalizada

	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	Suma	Suma/N	Vector de Priorización
AC1	0,0746	0,1225	0,1225	0,0930	0,0665	0,0442	0,0244	0,1225	0,6702	0,0838	
AC2	0,0959	0,1575	0,1575	0,1628	0,1676	0,1742	0,1707	0,1575	1,2437	0,1555	
AC3	0,0959	0,1575	0,1575	0,1628	0,1676	0,1742	0,1707	0,1575	1,2437	0,1555	
AC4	0,1119	0,1350	0,1350	0,1395	0,1436	0,1493	0,1463	0,1350	1,0957	0,1370	
AC5	0,1343	0,1125	0,1125	0,1163	0,1197	0,1244	0,1220	0,1125	0,9541	0,1193	
AC6	0,1678	0,0900	0,0900	0,0930	0,0957	0,0996	0,1220	0,0900	0,8481	0,1060	
AC7	0,2238	0,0675	0,0675	0,0698	0,0718	0,0597	0,0732	0,0675	0,7007	0,0876	
AC8	0,0959	0,1575	0,1575	0,1628	0,1676	0,1742	0,1707	0,1575	1,2437	0,1555	
											1,0000

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.

Matriz de Consistencia

	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	Suma Ponderada (Sp)	Vector Prior. (Vp)	Sp/Vp
AC1	0,0838	0,1209	0,1209	0,0913	0,0663	0,0471	0,0292	0,1209	0,6804	0,0838	8,1214
AC2	0,1077	0,1555	0,1555	0,1598	0,1670	0,1855	0,2044	0,1555	1,2908	0,1555	8,3028
AC3	0,1077	0,1555	0,1555	0,1598	0,1670	0,1855	0,2044	0,1555	1,2908	0,1555	8,3028
AC4	0,1257	0,1333	0,1333	0,1370	0,1431	0,1590	0,1752	0,1333	1,1397	0,1370	8,3213
AC5	0,1508	0,1110	0,1110	0,1141	0,1193	0,1325	0,1460	0,1110	0,9958	0,1193	8,3499
AC6	0,1885	0,0888	0,0888	0,0913	0,0954	0,1060	0,1460	0,0888	0,8937	0,1060	8,4305
AC7	0,2513	0,0666	0,0666	0,0685	0,0716	0,0636	0,0876	0,0666	0,7425	0,0876	8,4763
AC8	0,1077	0,1555	0,1555	0,1598	0,1670	0,1855	0,2044	0,1555	1,2908	0,1555	8,3028
										$\lambda_{m\acute{a}x}$	8,3259

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=8

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{8,3259 - 8}{8 - 1} = 0,0465$$

Con el valor de n, se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR, & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

		n													
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ICA		0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 1,404$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,0465}{1,404} = 0,03316$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización
AC1	1,00	8,38%
AC2	0,78	15,55%
AC3	0,78	15,55%
AC4	0,67	13,70%
AC5	0,56	11,93%
AC6	0,44	10,60%
AC7	0,33	8,76%
AC8	0,78	15,55%

□ CAPTACIÓN SUPERFICIAL (CS)

Tabla 88 Caracterización de Captación Superficial. Aplicación de PAJ

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{sfCS} PAJ
Isf_{CS1}	Grado de implantación de cuadros eléctricos equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación (%)	0,1	0,1	16%	0,4	1	13,98%
Isf_{CS2}	La antigüedad (años) y tipología constructiva de la instalación (HS-HA)	0	0,2	32%	0,8	1	26,55%
Isf_{CS3}	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería (%)	0,1	0	53%	1	1	23,97%

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{soCS} PAJ
Iso_{CS1}	Longitud total red alcantarillado (km)/Nº cámaras o pozos de registro	0,1	0,2	50%	0,8	1	19,27%
Iso_{CS2}	Longitud red alcantarillado por gravedad (km)/Longitud red Sto.-impulsada (km)	0,1	0,2	50%	0,8	1	16,24%

Fuente: Elaboración propia.

En adelante se utiliza la siguiente abreviatura para denominar a cada tipología de indicador, $I_{sCSn}=CSn$

CAPTACIÓN SUPERFICIAL	CS1	CS2	CS4	CS5	CS6
Asignación Escala Saaty	9	8	7	5	3
Valores asignados Homogeneizados	1	0,89	0,78	0,56	0,33

n= 5 (nº de indicadores)

Matriz de Comparación.

	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5
CS1	1,0000	0,8889	0,7778	0,5556	0,3333
CS2	1,1250	1,0000	1,1429	1,6000	2,6667
CS3	1,2857	0,8750	1,0000	1,4000	2,3333
CS4	1,8000	0,6250	0,7143	1,0000	1,6667
CS5	3,0000	0,3750	0,4286	0,6000	1,0000
Suma	8,2107	3,7639	4,0635	5,1556	8,0000

Matriz Normalizada

	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5	Suma	Vector de Priorización Suma/N
CS1	0,1218	0,2362	0,1914	0,1078	0,0417	0,6988	0,1398
CS2	0,1370	0,2657	0,2813	0,3103	0,3333	1,3276	0,2655
CS3	0,1566	0,2325	0,2461	0,2716	0,2917	1,1984	0,2397
CS4	0,2192	0,1661	0,1758	0,1940	0,2083	0,9634	0,1927
CS5	0,3654	0,0996	0,1055	0,1164	0,1250	0,8119	0,1624
							1,0000

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.

Matriz de Consistencia

	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5	Suma Ponderada (Sp)	Vector Prior. (Vp)	Sp/Vp
CS1	0,1398	0,2360	0,1864	0,1070	0,0541	0,7234	0,1398	5,1758
CS2	0,1572	0,2655	0,2739	0,3083	0,4330	1,4379	0,2655	5,4154
CS3	0,1797	0,2323	0,2397	0,2697	0,3789	1,3003	0,2397	5,4253
CS4	0,2516	0,1660	0,1712	0,1927	0,2706	1,0520	0,1927	5,4601
CS5	0,4193	0,0996	0,1027	0,1156	0,1624	0,8995	0,1624	5,5400
							$\lambda_{m\acute{a}x}$	5,4033

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=5

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{5,4033 - 5}{5 - 1} = 0,1008$$

Con el valor de n , se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

	n													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ICA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 1,115$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,1008}{1,115} = 0,0904$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización
CS1	1,00	13,98%
CS2	0,89	26,55%
CS3	0,78	23,97%
CS4	0,56	19,27%
CS5	0,33	16,24%

□ EMBALSE (EMB)

Tabla 89 Caracterización de Embalse. Aplicación de PAJ.

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{sfEMB} PAJ
I_{sfEMB1}	Antigüedad (años)/Naturaleza del material	0	0,3	50%	0,8	1	19,75%
I_{sfEMB2}	Nº y capacidad de desagüe /Nº y capacidad de desembalse de las compuertas o tomas.	0,1	0,3	50%	0,8	1	29,42%

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{soEMB} PAJ
I_{SOEMB1}	Volumen de agua fugada (m3) /Capacidad operativa embalse (Hm3)	0	0,3	50%	0,8	1	27,18%
I_{SOEMB2}	Grado de Mantenimiento [C-P]	0	0,3	50%	0,8	1	23,65%

Fuente: Elaboración propia.

En adelante se utiliza la siguiente abreviatura para denominar a cada tipología de indicador, $I_{sEMBn}=EMBn$

EMBALSE
Asignación Escala Saaty
Valores asignados Homogeneizados

EMB1	EMB2	EMB3	EMB4
9	8	7	5
1.00	0.89	0.78	0.56

n= 4 (nº de indicadores)

Matriz de Comparación.

	EMB1	EMB2	EMB3	EMB4
EMB1	1.0000	0.8889	0.7778	0.5556
EMB2	1.1250	1.0000	1.1429	1.6000
EMB3	1.2857	0.8750	1.0000	1.4000
EMB4	1.8000	0.6250	0.7143	1.0000
Suma	5.2107	3.3889	3.6349	4.5556

Matriz Normalizada

	EMB1	EMB2	EMB3	EMB4	Suma	Vector de Priorización Suma/N
EMB1	0.1919	0.2623	0.2140	0.1220	0.7901	0.1975
EMB2	0.2159	0.2951	0.3144	0.3512	1.1766	0.2942
EMB3	0.2467	0.2582	0.2751	0.3073	1.0874	0.2718
EMB4	0.3454	0.1844	0.1965	0.2195	0.9459	0.2365
						1.0000

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.

Matriz de Consistencia

	EMB1	EMB2	EMB3	EMB4	Suma Ponderada (Sp)	Vector Prior. (Vp)	Sp/Vp
EMB1	0.1975	0.2615	0.2114	0.1314	0.8018	0.1975	4.0591
EMB2	0.2222	0.2942	0.3107	0.3784	1.2054	0.2942	4.0979
EMB3	0.2540	0.2574	0.2718	0.3311	1.1143	0.2718	4.0989
EMB4	0.3556	0.1838	0.1942	0.2365	0.9700	0.2365	4.1022
							4.0895

$\lambda_{\text{máx}}$

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx.}} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=4

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx.}} - n}{n - 1} = \frac{4,0895 - 4}{4 - 1} = 0,0298$$

Con el valor de n , se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

	n													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ICA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 0,882$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,0298}{0,882} = 0,03383$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización PAJ
EMB1	1.00	19.75%
EMB2	0.89	29.42%
EMB3	0.78	27.18%
EMB4	0.56	23.65%

□ ESTANQUE (EST)

Tabla 90 Caracterización de Estanque. Aplicación de PAJ.

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral minino	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{sfEST} PAJ
Isf_{EST1}	La antigüedad (años) y material o tipología constructiva de la instalación (HS-HA)	0,00	0,20	18%	0,90	1	7,67%
Isf_{EST2}	Tipología de estructura: Superficial, Semienterrado, elevado.	0,70	0,30	16%	0,90	1	17,38%
Isf_{EST3}	Nº de cámaras o vasos (N)	0,10	0,10	13%	0,60	1	13,84%
Isf_{EST4}	Existencia de by-Pass y/o descarga previa de cámaras.	0,00	0,10	11%	0,50	1	15,60%
Isf_{EST5}	Disponibilidad de cámara de cloración.	0,00	0,20	14%	0,75	1	8,87%
Isf_{EST6}	Disponibilidad de elementos de Prevención y Control Sanitario	0,00	0,30	12%	0,75	1	10,45%
Isf_{EST7}	Tipo de instalación según caudal de entrada (m3/h).	0,00	0,20	16%	0,80	1	7,49%

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor minino	Indicador Valor umbral minino	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{soEST} PAJ
ISO_{EST1}	Autonomía (horas)/Caudal suministrado (m3/s)	0	0,2	50%	0,8	1	6,58%
ISO_{EST2}	Grado de Mantenimiento (C-P)	0,1	0,2	50%	0,8	1	12,12%

Fuente: Elaboración propia.

En adelante se utiliza la siguiente abreviatura para denominar a cada tipología de indicador, $I_{sESTn}=ESTn$

ESTANQUE	EST1	EST2	EST3	EST4	EST5	EST6	EST7	EST8	EST9
Asignación Escala Saaty	1	9	7	8	4	5	3	2	6
Valores asignados Homogeneizados	0.11	1.00	0.78	0.89	0.44	0.56	0.33	0.22	0.67

$n= 9$ (n° de indicadores)

Matriz de Comparación.

	EST1	EST2	EST3	EST4	EST5	EST6	EST7	EST8	EST9
EST1	1.0000	1.0000	0.7778	0.8889	0.4444	0.5556	0.3333	0.2222	0.6667
EST2	1.0000	1.0000	1.2857	1.1250	2.2500	1.8000	3.0000	4.5000	1.5000
EST3	1.2857	0.7778	1.0000	0.8750	1.7500	1.4000	2.3333	3.5000	1.1667
EST4	1.1250	0.8889	1.1429	1.0000	2.0000	1.6000	2.6667	4.0000	1.3333
EST5	2.2500	0.4444	0.5714	0.5000	1.0000	0.8000	1.3333	2.0000	0.6667
EST6	1.8000	0.5556	0.7143	0.6250	1.2500	1.0000	1.6667	2.5000	0.8333
EST7	3.0000	0.3333	0.4286	0.3750	0.7500	0.6000	1.0000	1.5000	0.5000
EST8	4.5000	0.2222	0.2857	0.2500	0.5000	0.4000	0.6667	1.0000	0.3333
EST9	1.5000	0.6667	0.8571	0.7500	1.5000	1.2000	2.0000	3.0000	1.0000
Suma	17.4607	5.8889	7.0635	6.3889	11.4444	9.3556	15.0000	22.2222	8.0000

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.

Matriz Normalizada.

	PTAP1	PTAP2	PTAP3	PTAP4	PTAP5	PTAP6	PTAP7	PTAP8	PTAP9	Suma	Vector de Priorización Suma/N
PTAP1	0.0067	0.1698	0.1391	0.1101	0.0833	0.0594	0.0388	0.0222	0.0100	0.6395	0.071
PTAP2	0.0603	0.1698	0.1761	0.1820	0.1875	0.1924	0.1966	0.2000	0.2025	1.5673	0.174
PTAP3	0.0679	0.1509	0.1565	0.1618	0.1667	0.1710	0.1748	0.1778	0.1800	1.4074	0.156
PTAP4	0.0776	0.1321	0.1370	0.1416	0.1458	0.1496	0.1529	0.1556	0.1575	1.2496	0.139
PTAP5	0.0905	0.1132	0.1174	0.1213	0.1250	0.1283	0.1311	0.1333	0.1350	1.0951	0.122
PTAP6	0.1086	0.0943	0.0978	0.1011	0.1042	0.1069	0.1092	0.1111	0.1125	0.9458	0.105
PTAP7	0.1358	0.0755	0.0783	0.0809	0.0833	0.0855	0.0874	0.0889	0.0900	0.8055	0.090
PTAP8	0.1810	0.0566	0.0587	0.0607	0.0625	0.0641	0.0655	0.0667	0.0675	0.6833	0.076
PTAP9	0.2715	0.0377	0.0391	0.0404	0.0417	0.0428	0.0437	0.0444	0.0450	0.6064	0.067
											1.00

Matriz de Consistencia

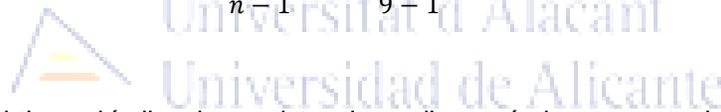
	EST1	EST2	EST3	EST4	EST5	EST6	EST7	EST8	EST9	Suma Ponderada (Sp)	Vector Prior. (Vp)	Sp/Vp
EST1	0.0767	0.1738	0.1077	0.1387	0.0394	0.0580	0.0250	0.0146	0.0808	0.7146	0.0767	9.3201
EST2	0.0767	0.1738	0.1780	0.1755	0.1997	0.1881	0.2247	0.2963	0.1818	1.6944	0.1738	9.7491
EST3	0.0986	0.1352	0.1384	0.1365	0.1553	0.1463	0.1748	0.2305	0.1414	1.3568	0.1384	9.8028
EST4	0.0863	0.1545	0.1582	0.1560	0.1775	0.1672	0.1997	0.2634	0.1616	1.5242	0.1560	9.7712
EST5	0.1725	0.0772	0.0791	0.0780	0.0887	0.0836	0.0999	0.1317	0.0808	0.8915	0.0887	10.0470
EST6	0.1380	0.0966	0.0989	0.0975	0.1109	0.1045	0.1248	0.1646	0.1010	1.0367	0.1045	9.9235
EST7	0.2300	0.0579	0.0593	0.0585	0.0666	0.0627	0.0749	0.0988	0.0606	0.7693	0.0749	10.2703
EST8	0.3450	0.0386	0.0395	0.0390	0.0444	0.0418	0.0499	0.0658	0.0404	0.7045	0.0658	10.7002
EST9	0.1150	0.1159	0.1186	0.1170	0.1331	0.1254	0.1498	0.1975	0.1212	1.1935	0.1212	9.8498
										$\lambda_{m\acute{a}x}$		9.9371

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=9

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{9,9371 - 9}{9 - 1} = 0,1171$$



Con el valor de n, se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

ICA	n													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 1,452$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,1171}{1,452} = 0,08067$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización PAJ
EST1	0.11	7.67%
EST2	1.00	17.38%
EST3	0.78	13.84%
EST4	0.89	15.60%
EST5	0.44	8.87%
EST6	0.56	10.45%
EST7	0.33	7.49%
EST8	0.22	6.58%
EST9	0.67	12.12%

□ PLANTA ELEVADORA DE AGUA POTABLE (PEAP)

Tabla 91 Caracterización de Planta elevadora de agua potable. Aplicación de PAJ.

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{sfPEAP} PAJ
Isf_{PEAP1}	Grado de implantación de cuadros eléctricos equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación (%)	0	0,1	11%	0,4	1	10,35%
Isf_{PEAP2}	La antigüedad (años) y material o tipología constructiva de la instalación (HS-HA)	0	0,2	22%	0,8	1	12,38%
Isf_{PEAP3}	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería (%)	0	0	37%	1	1	12,38%
Isf_{PEAP4}	Clasificación por capacidad de bombeo (l/s): $Q_b \leq 100$, $100 < Q_b < 1000$, $Q_b \geq 1000$.	0	0,1	30%	0,9	1	18,71%

Universitat d'Alacant

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínima	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{soPEAP} PAJ
ISO_{PEAP1}	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Agua producida (m3/s)	0	0,025	36%	0,9	1	17,01%
ISO_{PEAP2}	Grado de Mantenimiento (C-P)	0	0,2	24%	0,8	1	15,36%
ISO_{PEAP3}	Nº y tipología de averías de la instalación (anual) con parada de la instalación.	0,1	0,025	40%	1	1	13,80%

Fuente: Elaboración propia.

En adelante se utiliza la siguiente abreviatura para denominar a cada tipología de indicador, $I_{sPEAPn}=PEAPn$

PLANTA ELEVADORA DE AGUA POTABLE	PEAP1	PEAP2	PEAP3	PEAP4	PEAP5	PEAP6	PEAP7
Asignación Escala Saaty	4	5	5	9	8	7	6
Valores asignados Homogeneizados	0.44	0.56	0.56	1.00	0.89	0.78	0.67

n= 7 (nº de indicadores)

Matriz de Comparación.

	PEAP1	PEAP2	PEAP3	PEAP4	PEAP5	PEAP6	PEAP7
PEAP1	0.4444	0.5556	0.5556	1.0000	0.8889	0.7778	0.6667
PEAP2	1.8000	1.0000	1.0000	0.5556	0.6250	0.7143	0.8333
PEAP3	1.8000	1.0000	1.0000	0.5556	0.6250	0.7143	0.8333
PEAP4	1.0000	1.8000	1.8000	1.0000	1.1250	1.2857	1.5000
PEAP5	1.1250	1.6000	1.6000	0.8889	1.0000	1.1429	1.3333
PEAP6	1.2857	1.4000	1.4000	0.7778	0.8750	1.0000	1.1667
PEAP7	1.5000	1.2000	1.2000	0.6667	0.7500	0.8571	1.0000
Suma	8.9552	8.5556	8.5556	5.4444	5.8889	6.4921	7.3333

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.

Matriz Normalizada.

	PEAP1	PEAP2	PEAP3	PEAP4	PEAP5	PEAP6	PEAP7	Suma	Vector de Priorización Suma/N
PEAP1	0.0496	0.0649	0.0649	0.1837	0.1509	0.1198	0.0909	0.7248	0.104
PEAP2	0.2010	0.1169	0.1169	0.1020	0.1061	0.1100	0.1136	0.8666	0.124
PEAP3	0.2010	0.1169	0.1169	0.1020	0.1061	0.1100	0.1136	0.8666	0.124
PEAP4	0.1117	0.2104	0.2104	0.1837	0.1910	0.1980	0.2045	1.3097	0.187
PEAP5	0.1256	0.1870	0.1870	0.1633	0.1698	0.1760	0.1818	1.1906	0.170
PEAP6	0.1436	0.1636	0.1636	0.1429	0.1486	0.1540	0.1591	1.0754	0.154
PEAP7	0.1675	0.1403	0.1403	0.1224	0.1274	0.1320	0.1364	0.9662	0.138
									1,00

Matriz de Consistencia

	PEAP1	PEAP2	PEAP3	PEAP4	PEAP5	PEAP6	PEAP7	Suma Ponderada (Sp)	Vector Prior. (Vp)	Sp/Vp
PEAP1	0.0460	0.0688	0.0688	0.1871	0.1512	0.1195	0.0920	0.7334	0.1035	7.0826
PEAP2	0.1864	0.1238	0.1238	0.1039	0.1063	0.1097	0.1150	0.8690	0.1238	7.0194
PEAP3	0.1864	0.1238	0.1238	0.1039	0.1063	0.1097	0.1150	0.8690	0.1238	7.0194
PEAP4	0.1035	0.2228	0.2228	0.1871	0.1913	0.1975	0.2070	1.3323	0.1871	7.1203
PEAP5	0.1165	0.1981	0.1981	0.1663	0.1701	0.1756	0.1840	1.2087	0.1701	7.1063
PEAP6	0.1331	0.1733	0.1733	0.1455	0.1488	0.1536	0.1610	1.0888	0.1536	7.0871
PEAP7	0.1553	0.1486	0.1486	0.1247	0.1276	0.1317	0.1380	0.9745	0.1380	7.0597
										7.0707

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x.} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=7

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x.} - n}{n - 1} = \frac{7,0707 - 7}{7 - 1} = 0,01117$$

Con el valor de n, se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

ICA	n													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 1,341$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,01117}{1,341} = 0,00878$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización PAJ
PEAP1	0.44	10.35%
PEAP2	0.56	12.38%
PEAP3	0.56	12.38%
PEAP4	1.00	18.71%
PEAP5	0.89	17.01%
PEAP6	0.78	15.36%
PEAP7	0.67	13.80%

□ PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP)

Tabla 92 Caracterización de Planta de Tratamiento de agua potable. Aplicación de PAJ.

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{sfPTAP} PAJ
<i>Isf_{PTAP1}</i>	Antigüedad (años) y tipología constructiva de la instalación.	0	0,17	15%	0,67	1	7,11%
<i>Isf_{PTAP2}</i>	Infraestructura de entrada y decantación primaria (%)	0	0,11	14%	0,56	1	17,41%
<i>Isf_{PTAP3}</i>	Grado de equipamiento telemando y comunicaciones (%)	0	0,22	7%	0,44	1	15,64%
<i>Isf_{PTAP4}</i>	Grado de equipamiento de cloración. (%)	0	0,11	10%	0,44	1	13,88%
<i>Isf_{PTAP5}</i>	Grado de equipamiento de filtración (%)	0	0,11	27%	1,00	1	12,17%
<i>Isf_{PTAP6}</i>	Capacidad de tratamiento según rango de operación Turbidez (l/s): $Q_t \leq 100$, $100 < Q_t < 1000$, $Q_t \geq 1000$	0	0,11	27%	1,00	1	10,51%

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor minino	Indicador Valor umbral minino	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{soPTAP} PAJ
<i>ISO_{PTAP1}</i>	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Agua producida (m3/s)	0	0,3	23%	0,6	1	8,95%
<i>ISO_{PTAP2}</i>	Grado de Mantenimiento (C-P)	0,1	0,3	38%	0,8	1	7,59%
<i>ISO_{PTAP3}</i>	Nº y tipología de fallas anuales con parada de proceso	0,1	0,3	38%	0,8	1	6,74%

Fuente: Elaboración propia.

En adelante se utiliza la siguiente abreviatura para denominar a cada tipología de indicador, $I_{sPTAPn}=PTAPn$

PLANTA TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	PTAP1	PTAP2	PTAP3	PTAP4	PTAP5	PTAP6	PTAP7	PTAP8	PTAP9
Asignación Escala Saaty	1	9	8	7	6	5	4	3	2
Valores asignados Homogeneizados	0.11	1.00	0.89	0.78	0.67	0.56	0.44	0.33	0.22

$n= 9$ (n° de indicadores)

Matriz de Comparación.

	PTAP1	PTAP2	PTAP3	PTAP4	PTAP5	PTAP6	PTAP7	PTAP8	PTAP9
PTAP1	0.1111	1.0000	0.8889	0.7778	0.6667	0.5556	0.4444	0.3333	0.2222
PTAP2	1.0000	1.0000	1.1250	1.2857	1.5000	1.8000	2.2500	3.0000	4.5000
PTAP3	1.1250	0.8889	1.0000	1.1429	1.3333	1.6000	2.0000	2.6667	4.0000
PTAP4	1.2857	0.7778	0.8750	1.0000	1.1667	1.4000	1.7500	2.3333	3.5000
PTAP5	1.5000	0.6667	0.7500	0.8571	1.0000	1.2000	1.5000	2.0000	3.0000
PTAP6	1.8000	0.5556	0.6250	0.7143	0.8333	1.0000	1.2500	1.6667	2.5000
PTAP7	2.2500	0.4444	0.5000	0.5714	0.6667	0.8000	1.0000	1.3333	2.0000
PTAP8	3.0000	0.3333	0.3750	0.4286	0.5000	0.6000	0.7500	1.0000	1.5000
PTAP9	4.5000	0.2222	0.2500	0.2857	0.3333	0.4000	0.5000	0.6667	1.0000
Suma	16.5718	5.8889	6.3889	7.0635	8.0000	9.3556	11.4444	15.0000	22.2222

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.

Matriz Normalizada.

	PTAP1	PTAP2	PTAP3	PTAP4	PTAP5	PTAP6	PTAP7	PTAP8	PTAP9	Suma	Vector de Priorización
											Suma/N
PTAP1	0.0067	0.1698	0.1391	0.1101	0.0833	0.0594	0.0388	0.0222	0.0100	0.6395	0.071
PTAP2	0.0603	0.1698	0.1761	0.1820	0.1875	0.1924	0.1966	0.2000	0.2025	1.5673	0.174
PTAP3	0.0679	0.1509	0.1565	0.1618	0.1667	0.1710	0.1748	0.1778	0.1800	1.4074	0.156
PTAP4	0.0776	0.1321	0.1370	0.1416	0.1458	0.1496	0.1529	0.1556	0.1575	1.2496	0.139
PTAP5	0.0905	0.1132	0.1174	0.1213	0.1250	0.1283	0.1311	0.1333	0.1350	1.0951	0.122
PTAP6	0.1086	0.0943	0.0978	0.1011	0.1042	0.1069	0.1092	0.1111	0.1125	0.9458	0.105
PTAP7	0.1358	0.0755	0.0783	0.0809	0.0833	0.0855	0.0874	0.0889	0.0900	0.8055	0.090
PTAP8	0.1810	0.0566	0.0587	0.0607	0.0625	0.0641	0.0655	0.0667	0.0675	0.6833	0.076
PTAP9	0.2715	0.0377	0.0391	0.0404	0.0417	0.0428	0.0437	0.0444	0.0450	0.6064	0.067
											1.00

Matriz de Consistencia

	PTAP1	PTAP2	PTAP3	PTAP4	PTAP5	PTAP6	PTAP7	PTAP8	PTAP9	Suma Ponderada (Sp)	Vector Prior. (Vp)	Sp/Vp
PTAP1	0.0079	0.1741	0.1390	0.1080	0.0811	0.0584	0.0398	0.0253	0.0150	0.6486	0.0711	9.1275
PTAP2	0.0711	0.1741	0.1759	0.1785	0.1825	0.1892	0.2014	0.2278	0.3032	1.7037	0.1741	9.7834
PTAP3	0.0799	0.1548	0.1564	0.1587	0.1622	0.1681	0.1790	0.2025	0.2695	1.5312	0.1564	9.7917
PTAP4	0.0914	0.1354	0.1368	0.1388	0.1420	0.1471	0.1566	0.1772	0.2358	1.3612	0.1388	9.8034
PTAP5	0.1066	0.1161	0.1173	0.1190	0.1217	0.1261	0.1343	0.1519	0.2021	1.1950	0.1217	9.8208
PTAP6	0.1279	0.0967	0.0977	0.0992	0.1014	0.1051	0.1119	0.1265	0.1684	1.0349	0.1051	9.8481
PTAP7	0.1599	0.0774	0.0782	0.0793	0.0811	0.0841	0.0895	0.1012	0.1348	0.8855	0.0895	9.8936
PTAP8	0.2132	0.0580	0.0586	0.0595	0.0608	0.0631	0.0671	0.0759	0.1011	0.7574	0.0759	9.9753
PTAP9	0.3198	0.0387	0.0391	0.0397	0.0406	0.0420	0.0448	0.0506	0.0674	0.6826	0.0674	10.1302
											$\lambda_{m\acute{a}x}$	9.7971

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=8

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{9,7971 - 9}{9 - 1} = 0,0996$$

Con el valor de n, se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR, & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

		n													
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ICA		0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 1,452$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,0996}{1,452} = 0,0686$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización PAJ
PTAP1	0.11	7.11%
PTAP2	1.00	17.41%
PTAP3	0.89	15.64%
PTAP4	0.78	13.88%
PTAP5	0.67	12.17%
PTAP6	0.56	10.51%
PTAP7	0.44	8.95%
PTAP8	0.33	7.59%
PTAP9	0.22	6.74%

□ POZO DE CAPTACIÓN (PC)

Tabla 93 Caracterización de Pozos de Captación. Aplicación de PAJ.

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{sfPC} PAJ
Isf_{PC1}	Grado de implantación de cuadros eléctricos equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación (%)	0	0,1	11%	0,4	1	12,19%
Isf_{PC2}	La antigüedad (años) y naturaleza material de la estructura de la instalación (HS-HA).	0	0,2	22%	0,8	1	14,53%
Isf_{PC3}	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería (%)	0	0	37%	1	1	15,88%
Isf_{PC4}	Clasificación por capacidad de bombeo (l/s): $Q_b \leq 100$, $100 < Q_b < 1000$, $Q_b \geq 1000$.	0	0,1	30%	0,9	1	17,43%

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor Mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{soPC} PAJ
ISO_{PC1}	Grado de Mantenimiento (C-P)	0,1	0,2	50%	0,8	1	20,86%
ISO_{PC2}	Nº y tipología de averías de la instalación (anual) con parada de la instalación.	0,1	0,2	50%	0,8	1	19,10%

Fuente: Elaboración propia.

En adelante se utiliza la siguiente abreviatura para denominar a cada tipología de indicador, $I_{sPCn}=PCn$

POZO CAPTACIÓN
Asignación Escala Saaty
Valores asignados
Homogeneizados

PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
9	8	7	6	5	3
1.00	0.89	0.78	0.67	0.56	0.33

$n= 6$ (n° de indicadores)

Matriz de Comparación.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
PC1	1.0000	0.8889	0.7778	0.6667	0.5556	0.3333
PC2	1.1250	1.0000	1.1429	1.3333	1.6000	2.6667
PC3	1.2857	0.8750	0.8750	1.1667	1.4000	2.3333
PC4	1.5000	0.7500	0.8571	1.0000	1.2000	2.0000
PC5	1.8000	0.6250	0.7143	0.8333	1.0000	1.6667
PC6	3.0000	0.3750	0.4286	0.5000	0.6000	1.0000
Suma	9.7107	4.5139	4.7956	5.5000	6.3556	10.0000

Matriz Normalizada



	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	Suma	Vector de Priorización
PC1	0.1030	0.1969	0.1622	0.1212	0.0874	0.0333	0.7040	0.117
PC2	0.1159	0.2215	0.2383	0.2424	0.2517	0.2667	1.3365	0.223
PC3	0.1324	0.1938	0.1825	0.2121	0.2203	0.2333	1.1744	0.196
PC4	0.1545	0.1662	0.1787	0.1818	0.1888	0.2000	1.0700	0.178
PC5	0.1854	0.1385	0.1489	0.1515	0.1573	0.1667	0.9483	0.158
PC6	0.3089	0.0831	0.0894	0.0909	0.0944	0.1000	0.7667	0.128
								1.000

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.

Matriz de Consistencia

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	Suma Ponderada (Sp)	Vector Prior. (Vp)
PC1	0.1173	0.1980	0.1522	0.1189	0.0878	0.0426	0.7169	0.1173
PC2	0.1320	0.2228	0.2237	0.2378	0.2529	0.3408	1.4099	0.2228
PC3	0.1509	0.1949	0.1713	0.2081	0.2213	0.2982	1.2445	0.1957
PC4	0.1760	0.1671	0.1678	0.1783	0.1897	0.2556	1.1344	0.1783
PC5	0.2112	0.1392	0.1398	0.1486	0.1580	0.2130	1.0099	0.1580
PC6	0.3520	0.0835	0.0839	0.0892	0.0948	0.1278	0.8312	0.1278
							$\lambda_{m\acute{a}x}$	6.3421

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=6

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{6,3421 - 6}{6 - 1} = 0,0684$$

Con el valor de n, se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

	n													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ICA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 1,252$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,0684}{1,252} = 0,0546$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización PAJ
PC1	1.00	11.73%
PC2	0.89	22.28%
PC3	0.78	19.57%
PC4	0.67	17.83%
PC5	0.56	15.80%
PC6	0.33	12.78%

□ RED DE DISTRIBUCIÓN (RD)

Tabla 94 Caracterización de Redes de distribución. Aplicación PAJ.

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor minino	Indicador Valor umbral minino	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W _{sRD} PAJ
<i>Isf_{RD1}</i>	Antigüedad (años)/Naturaleza del material	0	0,3	23%	0,6	1	12,19%
<i>Isf_{RD2}</i>	Nº de conexiones con unión flexible/Nº cámaras de inspección	0	0,3	38%	0,8	1	17,43%
<i>Isf_{RD3}</i>	Nº válvulas telemandadas/Nº total de válvulas de corte.	0	0,3	38%	0,8	1	14,53%

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor minino	Indicador Valor umbral minino	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W _{sRD} PAJ
<i>ISO_{RD1}</i>	Nº de roturas no provocadas(año)/Longitud de red de distribución (km)	0	0,04	72%	1,00	1	19,10%
<i>ISO_{RD2}</i>	Grado de Mantenimiento (I-VI)	0,1	0,29	16%	0,50	1	15,88%
<i>ISO_{RD3}</i>	Nº de válvulas de corte/Nº arranques domiciliarios.	0	0,17	13%	0,33	1	20,86%

Fuente: Elaboración propia.

En adelante se utiliza la siguiente abreviatura para denominar a cada tipología de indicador, $I_{sRDn}=RDn$

RED DE DISTRIBUCIÓN	RD1	RD2	RD3	RD4	RD5	RD6
Asignación Escala Saaty	9	8	7	6	5	3
Valores asignados Homogeneizados	1.00	0.89	0.78	0.67	0.56	0.33

$n= 6$ (n° de indicadores)

Matriz de Comparación.

	RD1	RD2	RD3	RD4	RD5	RD6
RD1	1.0000	0.8889	0.7778	0.6667	0.5556	0.3333
RD2	1.1250	1.0000	1.1429	1.3333	1.6000	2.6667
RD3	1.2857	0.8750	1.0000	1.1667	1.4000	2.3333
RD4	1.5000	0.7500	0.8571	1.0000	1.2000	2.0000
RD5	1.8000	0.6250	0.7143	0.8333	1.0000	0.5556
RD6	3.0000	0.3750	0.4286	0.5000	1.8000	1.0000
Suma	9.7107	4.5139	4.9206	5.5000	7.5556	8.8889



Matriz Normalizada

	RD1	RD2	RD3	RD4	RD5	RD6	Suma	Vector de Priorización
RD1	0.1030	0.1969	0.1622	0.1212	0.0874	0.0333	0.7040	0.117
RD2	0.1159	0.2215	0.2383	0.2424	0.2517	0.2667	1.3365	0.223
RD3	0.1324	0.1938	0.1825	0.2121	0.2203	0.2333	1.1744	0.196
RD4	0.1545	0.1662	0.1787	0.1818	0.1888	0.2000	1.0700	0.178
RD5	0.1854	0.1385	0.1489	0.1515	0.1573	0.1667	0.9483	0.158
RD6	0.3089	0.0831	0.0894	0.0909	0.0944	0.1000	0.7667	0.128
								1.000

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.

Matriz de Consistencia

	RD1	RD2	RD3	RD4	RD5	RD6	Vector Prior. (Vp)	Sp/Vp
RD1	0.1173	0.1980	0.1522	0.1189	0.0878	0.0426	0.1173	6.1093
RD2	0.1320	0.2228	0.2237	0.2378	0.2529	0.3408	0.2228	6.3292
RD3	0.1509	0.1949	0.1713	0.2081	0.2213	0.2982	0.1957	6.3581
RD4	0.1760	0.1671	0.1678	0.1783	0.1897	0.2556	0.1783	6.3613
RD5	0.2112	0.1392	0.1398	0.1486	0.1580	0.2130	0.1580	6.3897
RD6	0.3520	0.0835	0.0839	0.0892	0.0948	0.1278	0.1278	6.5050
							$\lambda_{m\acute{a}x}$	6.3421

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=5

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{6,3421 - 6}{6 - 1} = 0,0684$$

Con el valor de n, se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR, & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

ICA	n													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR, & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 1,252$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,0684}{1,252} = 0,0546$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización PAJ
RD1	1.00	11.73%
RD2	0.89	22.28%
RD3	0.78	19.57%
RD4	0.67	17.83%
RD5	0.56	15.80%
RD6	0.33	12.78%

□ RED DE TRANSPORTE (RT)

Tabla 95 Caracterización de la Red de Transporte. Aplicación de PAJ.

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{sfRT} PAJ
Isf_{RT1}	Antigüedad (años)/Naturaleza del material	0	0,17	56%	1,00	1	30,67%
Isf_{RT2}	Nº de derivaciones con unión flexible/Nº cámaras de inspección	0	0,00	44%	0,67	1	21,55%

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{soRT} PAJ
ISO_{RT1}	Nº reparaciones /Longitud total de red de transporte (km)	0	0,10	56%	0,90	1	24,86%
ISO_{RT2}	Grado de Mantenimiento [C-P]	0	0,20	44%	0,83	1	22,92%

Fuente: Elaboración propia.

En adelante se utiliza la siguiente abreviatura para denominar a cada tipología de indicador, $I_{sRTn}=RTn$

RED DE TRANSPORTE	RT1	RT2	RT3	RT4
Asignación Escala Saaty	9	8	7	5
Valores asignados Homogeneizados	1.00	0.89	0.78	0.56

$n= 4$ (nº de indicadores)

Matriz de Comparación.

	RT1	RT2	RT3	RT4
RT1	1.0000	0.8889	0.7778	0.5556
RT2	1.1250	1.0000	1.1429	1.6000
RT3	1.2857	0.8750	1.0000	1.4000
RT4	1.8000	0.6250	0.7143	1.0000
Suma	5.2107	3.3889	3.6349	4.5556

Matriz Normalizada

	RT1	RT2	RT3	RT4	Suma	Vector de Priorización
RT1	0.1919	0.2623	0.2140	0.1220	0.7901	Suma/N
RT2	0.2159	0.2951	0.3144	0.3512	1.1766	0.1975
RT3	0.2467	0.2582	0.2751	0.3073	1.0874	0.2942
RT4	0.3454	0.1844	0.1965	0.2195	0.9459	0.2718
						0.2365
						1.0000

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.

Matriz de Consistencia

	RT1	RT2	RT3	RT4	Suma Ponderada (Sp)	Vector Prior. (Vp)	Sp/Vp
RT1	0.1975	0.2615	0.2114	0.1314	0.8018	0.1975	4.0591
RT2	0.2222	0.2942	0.3107	0.3784	1.2054	0.2942	4.0979
RT3	0.2540	0.2574	0.2718	0.3311	1.1143	0.2718	4.0989
RT4	0.3556	0.1838	0.1942	0.2365	0.9700	0.2365	4.1022
						$\lambda_{m\acute{a}x}$	4.0895

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=5

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{0,895 - 4}{4 - 1} = 0,0298$$

Con el valor de n, se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR, & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

		n													
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ICA		0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 0,882$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,0298}{0,882} = 0,0338$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización PAJ
RT1	1.00	19.75%
RT2	0.89	29.42%
RT3	0.78	27.18%
RT4	0.56	23.65%

PLANTA ELEVADORA DE AGUAS SERVIDAS (PEAS)

Tabla 96 Caracterización de Planta Elevadora de Aguas Servidas. Aplicación de PAJ.

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{sfPEAS} PAJ
Isf_{PEAS1}	Grado de implantación de cuadros eléctricos de equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación.	0	0.1	11%	0.4	1	22.05%
Isf_{PEAS2}	La antigüedad (años) y tipología constructiva de la instalación (HS-HA)	0	0.2	22%	0.8	1	10.72%
Isf_{PEAS3}	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería.	0	0	37%	1	1	16.02%
Isf_{PEAS4}	Clasificación por capacidad de bombeo (l/s): $Q_b \leq 100$, $100 < Q_b < 1000$, $Q_b \geq 1000$.	0	0.1	30%	0.9	1	10.00%

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{soPEAS} PAJ
ISO_{PEAS1}	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Agua elevada (m ³ /s)	0	0.2	33%	0.8	1	13.41%
ISO_{PEAS2}	Grado de Mantenimiento (C-P)	0	0.2	33%	0.8	1	11.79%
ISO_{PEAS3}	Nº y tipología de averías de la instalación (anual)	0	0.2	33%	0.8	1	16.02%

Fuente: Elaboración propia.

En adelante se utiliza la siguiente abreviatura para denominar a cada tipología de indicador, $I_{sPEASn}=PEASn$

PLANTA ELEVADORA DE AGUAS SERVIDAS	PEAS1	PEAS2	PEAS3	PEAS4	PEAS5	PEAS6	PEAS7
Asignación Escala Saaty	9	7	4	8	5	6	4
Valores asignados Homogeneizados	1,00	0,78	0,44	0,89	0,56	0,67	0,44

n= 7 (nº de indicadores)

Matriz de Comparación.

	PEAS1	PEAS2	PEAS3	PEAS4	PEAS5	PEAS6	PEAS7
PEAS1	1,0000	0,7778	0,4444	0,8889	0,5556	0,6667	0,4444
PEAS2	1,2857	1,0000	1,7500	0,8750	1,4000	1,1667	1,7500
PEAS3	2,2500	0,5714	1,0000	0,5000	0,8000	0,6667	1,0000
PEAS4	1,1250	1,1429	2,0000	1,0000	1,6000	1,3333	2,0000
PEAS5	1,8000	0,7143	1,2500	0,6250	1,0000	0,8333	1,2500
PEAS6	1,5000	0,8571	1,5000	0,7500	1,2000	1,0000	1,5000
PEAS7	2,2500	0,5714	1,0000	0,5000	0,8000	0,6667	1,0000
Suma	11,2107	5,6349	8,9444	5,1389	7,3556	6,3333	8,9444

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.

Matriz Normalizada.

	PEAS1	PEAS2	PEAS3	PEAS4	PEAS5	PEAS6	PEAS7	Suma	Vector de Priorización Suma/N
PEAS1	0,0892	0,1380	0,0497	0,1730	0,0755	0,1053	0,0497	0,6804	0,097
PEAS2	0,1147	0,1775	0,1957	0,1703	0,1903	0,1842	0,1957	1,2283	0,175
PEAS3	0,2007	0,1014	0,1118	0,0973	0,1088	0,1053	0,1118	0,8370	0,120
PEAS4	0,1004	0,2028	0,2236	0,1946	0,2175	0,2105	0,2236	1,3730	0,196
PEAS5	0,1606	0,1268	0,1398	0,1216	0,1360	0,1316	0,1398	0,9560	0,137
PEAS6	0,1338	0,1521	0,1677	0,1459	0,1631	0,1579	0,1677	1,0883	0,155
PEAS7	0,2007	0,1014	0,1118	0,0973	0,1088	0,1053	0,1118	0,8370	0,120
									1,00

Matriz de Consistencia

	PEAS1	PEAS2	PEAS3	PEAS4	PEAS5	PEAS6	PEAS7	Suma Ponderada (Sp)	Vector Prior. (Vp)	Sp/Vp
PEAS1	0,0972	0,1365	0,0531	0,1744	0,0759	0,1036	0,0531	0,6938	0,0972	7,1385
PEAS2	0,1250	0,1755	0,2093	0,1716	0,1912	0,1814	0,2093	1,2632	0,1755	7,1988
PEAS3	0,2187	0,1003	0,1196	0,0981	0,1093	0,1036	0,1196	0,8691	0,1196	7,2680
PEAS4	0,1093	0,2005	0,2392	0,1961	0,2185	0,2073	0,2392	1,4101	0,1961	7,1892
PEAS5	0,1750	0,1253	0,1495	0,1226	0,1366	0,1296	0,1495	0,9879	0,1366	7,2341
PEAS6	0,1458	0,1504	0,1794	0,1471	0,1639	0,1555	0,1794	1,1214	0,1555	7,2128
PEAS7	0,2187	0,1003	0,1196	0,0981	0,1093	0,1036	0,1196	0,8691	0,1196	7,2680
									$\lambda_{m\acute{a}x}$	7,2156

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=7

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{7,2156 - 7}{7 - 1} = 0,0354$$

Con el valor de n, se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR, & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

	n													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ICA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR, & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 1,341$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,0354}{1,341} = 0,0264$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización PAJ
PEAS1	1,00	4,97%
PEAS2	0,78	19,57%
PEAS3	0,44	11,18%
PEAS4	0,89	22,36%
PEAS5	0,56	13,98%
PEAS6	0,67	16,77%
PEAS7	0,44	11,18%



PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS (PTAS)

Tabla 97 Caracterización de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas. Aplicación de PAJ.

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{sfPTAS} PAJ
Isf_{PTAS1}	Antigüedad (años) y tipología constructiva de la instalación.	0	0.2	20%	0.8	1	23.23%
Isf_{PTAS2}	Grado de equipamiento telemando y comunicaciones (%)	0	0.2	20%	0.8	1	7.14%
Isf_{PTAS3}	Grado de implantación de equipamiento electromecánico. (%)	0	0.2	20%	0.8	1	7.55%
Isf_{PTAS4}	Grado de equipamiento cloración y equipamiento de desinfección. (%)	0	0.2	20%	0.8	1	8.19%
Isf_{PTAS5}	Clasificación por capacidad de tratamiento Q_t (l/s) (Pequeña, Mediana, Grande).	0	0.2	20%	0.8	1	9.20%

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{soPTAS} PAJ
ISO_{PTAS1}	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Agua producida (m3/s)	0	0.3	23%	0.6	1	10.86%
ISO_{PTAS2}	Grado de Mantenimiento (C-P)	0	0.3	38%	0.8	1	13.82%
ISO_{PTAS3}	Nº y tipología de fallas anuales	0	0.3	38%	0.8	1	20.02%

Fuente: Elaboración propia.

En adelante se utiliza la siguiente abreviatura para denominar a cada tipología de indicador,

$$Is_{PTASn}=PTASn$$

RED DE AGUAS SERVIDAS	PTAS1	PTAS2	PTAS3	PTAS4	PTAS5	PTAS6	PTAS7	PTAS8
Asignación Escala Saaty	9	8	7	6	5	4	3	2
Valores asignados Homogeneizados	1,00	1,13	1,29	1,50	1,80	2,25	3,00	4,50

n= 8 (nº de indicadores)

Matriz de Comparación.

	PTAS1	PTAS2	PTAS3	PTAS4	PTAS5	PTAS6	PTAS7	PTAS8
PTAS1	1,0000	1,1250	1,2857	1,5000	1,8000	2,2500	3,0000	4,5000
PTAS2	0,8889	1,0000	0,8750	0,7500	0,6250	0,5000	0,3750	0,2500
PTAS3	0,7778	1,1429	1,0000	0,8571	0,7143	0,5714	0,4286	0,2857
PTAS4	0,6667	1,3333	1,1667	1,0000	0,8333	0,6667	0,5000	0,3333
PTAS5	0,5556	1,6000	1,4000	1,2000	1,0000	0,8000	0,6000	0,4000
PTAS6	0,4444	2,0000	1,7500	1,5000	1,2500	1,0000	0,7500	0,5000
PTAS7	0,3333	2,6667	2,3333	2,0000	1,6667	1,3333	1,0000	0,6667
PTAS8	0,2222	4,0000	3,5000	3,0000	2,5000	2,0000	1,5000	1,0000
Suma	4,8889	14,8679	13,3107	11,8071	10,3893	9,1214	8,1536	7,9357

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.



Matriz Normalizada.

	PTAS1	PTAS2	PTAS3	PTAS4	PTAS5	PTAS6	PTAS7	PTAS8	Suma	Vector de Priorización
PTAS1	0,2045	0,0757	0,0966	0,1270	0,1733	0,2467	0,3679	0,5671	1,8588	0,2323
PTAS2	0,1818	0,0673	0,0657	0,0635	0,0602	0,0548	0,0460	0,0315	0,5708	0,0714
PTAS3	0,1591	0,0769	0,0751	0,0726	0,0688	0,0626	0,0526	0,0360	0,6036	0,0755
PTAS4	0,1364	0,0897	0,0876	0,0847	0,0802	0,0731	0,0613	0,0420	0,6550	0,0819
PTAS5	0,1136	0,1076	0,1052	0,1016	0,0963	0,0877	0,0736	0,0504	0,7360	0,0920
PTAS6	0,0909	0,1345	0,1315	0,1270	0,1203	0,1096	0,0920	0,0630	0,8689	0,1086
PTAS7	0,0682	0,1794	0,1753	0,1694	0,1604	0,1462	0,1226	0,0840	1,1055	0,1382
PTAS8	0,0455	0,2690	0,2629	0,2541	0,2406	0,2193	0,1840	0,1260	1,6014	0,2002
										1,0000

Matriz de Consistencia

	PTAS1	PTAS2	PTAS3	PTAS4	PTAS5	PTAS6	PTAS7	PTAS8	Suma Ponderada (Sp)	Vector Prior. (Vp)	Sp/Vp
PTAS 1	0,2323	0,0803	0,0970	0,1228	0,1656	0,2444	0,4146	0,9008	2,2578	0,2323	9,7172
PTAS 2	0,2065	0,0714	0,0660	0,0614	0,0575	0,0543	0,0518	0,0500	0,6190	0,0714	8,6752
PTAS 3	0,1807	0,0815	0,0755	0,0702	0,0657	0,0621	0,0592	0,0572	0,6521	0,0755	8,6420
PTAS 4	0,1549	0,0951	0,0880	0,0819	0,0767	0,0724	0,0691	0,0667	0,7048	0,0819	8,6085
PTAS 5	0,1291	0,1142	0,1056	0,0983	0,0920	0,0869	0,0829	0,0801	0,7890	0,0920	8,5760
PTAS 6	0,1033	0,1427	0,1320	0,1228	0,1150	0,1086	0,1036	0,1001	0,9282	0,1086	8,5459
PTAS 7	0,0774	0,1903	0,1761	0,1638	0,1533	0,1448	0,1382	0,1334	1,1773	0,1382	8,5199
PTAS 8	0,0516	0,2854	0,2641	0,2456	0,2300	0,2172	0,2073	0,2002	1,7014	0,2002	8,4997
$\lambda_{m\acute{a}x}$											8,7230

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=8

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{8,7230 - 8}{8 - 1} = 0,10329$$

Con el valor de n, se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

	n													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ICA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 1,404$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,10329}{1,404} = 0,0735$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización PAJ
PTAS1	1,00	7,86%
PTAS2	0,89	19,23%
PTAS3	0,78	17,06%
PTAS4	0,67	14,92%
PTAS5	0,56	12,85%
PTAS6	0,44	10,90%
PTAS7	0,33	9,17%
PTAS8	0,22	8,01%



□ RED DE AGUAS SERVIDAS (RAS)

Tabla 98 Caracterización de la Red de Aguas Servidas. Aplicación de PAJ.

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor minino	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{sfRAS} PAJ
Isf_{RAS1}	Longitud total red alcantarillado (km)/Nº cámaras o pozos de registro	0	0.05	14%	0.25	1	3.92%
Isf_{RAS2}	Longitud red alcantarillado por gravedad (km)/Longitud red alcantarillado-impulsada (km)	0	0.05	12%	0.23	1	10.38%
Isf_{RAS3}	Antigüedad de la red de alcantarillado (años) y naturaleza material.	0	0.05	12%	0.23	1	4.24%
Isf_{RAS4}	Longitud (km) red alcantarillado no visitable inspeccionada deteriorada/Longitud total red de alcantarillado no visitable inspeccionada (km)	0	0.09	25%	0.45	1	7.25%
Isf_{RAS5}	Longitud total red de alcantarillado (km)/Nº infiltraciones de agua en tubería red de alcantarillado (anual)	0	0.45	37%	1.00	1	7.25%

Denominación	Denominación del indicador	Indicador Valor mínimo	Indicador Valor umbral mínimo	Peso Indicador	Indicador Valor umbral máximo	Indicador Valor Máximo	W_{soRAS} PAJ
ISO_{RAS1}	Nº de roturas no provocadas (año)/Longitud de red de alcantarillado (km)	0.1	0.10	18%	0.90	1	7.25%
ISO_{RAS2}	Grado de Mantenimiento [I-V]	0.05	0.20	16%	0.90	1	19.93%
ISO_{RAS3}	Longitud red de alcantarillado renovada, material, km/año	0.1	0.30	11%	0.80	1	11.36%
ISO_{RAS4}	Longitud red de alcantarillado inspeccionada, material (km/año)/Longitud total red (km).	0.1	0.20	16%	0.90	1	7.25%
ISO_{RAS5}	Tn. lodos extraídos de la red de alcantarillado al año/Longitud de red alcantarillado (km).	0.1	0.10	18%	0.90	1	7.25%
ISO_{RAS6}	Nº de cámaras o pozos de alcantarillado limpiados/Nº total de cámaras o pozos de alcantarillado	0.1	0.30	9%	0.70	1	7.25%
ISO_{RAS7}	Nº clientes afectados por obstrucciones-año/ Nº total de clientes.	0.1	0.10	13%	0.70	1	6.66%

Fuente: Elaboración propia.

En adelante se utiliza la siguiente abreviatura para denominar a cada tipología de indicador, $I_{sRASn}=RASn$

RED DE AGUAS SERVIDAS	RAS1	RAS2	RAS3	RAS4	RAS5	RAS6	RAS7	RAS8	RAS9	RAS10	RAS11	RAS12
Asignación Escala Saaty	7.00	3.00	1.00	3.00	3.00	3.00	9.00	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Valores asignados Homogeneizados	0.78	0.33	0.11	0.33	0.33	0.33	1.00	0.56	0.33	0.33	0.33	0.33

n= 12 (nº de indicadores)

Matriz de Comparación.

	RAS1	RAS2	RAS3	RAS4	RAS5	RAS6	RAS7	RAS8	RAS9	RAS10	RAS11	RAS12
RAS1	0.7778	0.3333	0.1111	0.3333	0.3333	0.3333	1.0000	0.5556	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333
RAS2	3.0000	1.0000	3.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.6000	1.0000	1.0000	1.0000	9.0000
RAS3	9.0000	0.3333	1.0000	0.3333	0.3333	0.3333	0.1111	0.2000	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333
RAS4	3.0000	1.0000	3.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.6000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
RAS5	3.0000	1.0000	3.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.6000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
RAS6	3.0000	1.0000	3.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.6000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
RAS7	1.0000	3.0000	9.0000	3.0000	3.0000	3.0000	1.0000	1.8000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
RAS8	1.8000	1.6667	5.0000	1.6667	1.6667	1.6667	0.5556	1.0000	1.6667	1.6667	1.6667	1.6667
RAS9	3.0000	1.0000	3.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.6000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
RAS10	3.0000	1.0000	3.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.6000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
RAS11	3.0000	1.0000	3.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.6000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
RAS12	3.0000	0.1111	3.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.6000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Suma	36.5778	12.4444	39.1111	13.3333	13.3333	13.3333	5.3333	8.3556	13.3333	13.3333	13.3333	21.3333

Cálculo de la Relación de Consistencia (RC), se utiliza la matriz de comparación inicial (1) y se multiplican los valores de cada una de las columnas con el vector de priorización.

Matriz Normalizada.

	RAS1	RAS2	RAS3	RAS4	RAS5	RAS6	RAS7	RAS8	RAS9	RAS10	RAS11	RAS12	Suma	Suma/N
RAS1	0.0213	0.0268	0.0028	0.0250	0.0250	0.0250	0.1875	0.0665	0.0250	0.0250	0.0250	0.0156	0.4705	0.0392
RAS2	0.0820	0.0804	0.0767	0.0750	0.0750	0.0750	0.0625	0.0718	0.0750	0.0750	0.0750	0.4219	1.2453	0.1038
RAS3	0.2461	0.0268	0.0256	0.0250	0.0250	0.0250	0.0208	0.0239	0.0250	0.0250	0.0250	0.0156	0.5088	0.0424
RAS4	0.0820	0.0804	0.0767	0.0750	0.0750	0.0750	0.0625	0.0718	0.0750	0.0750	0.0750	0.0469	0.8703	0.0725
RAS5	0.0820	0.0804	0.0767	0.0750	0.0750	0.0750	0.0625	0.0718	0.0750	0.0750	0.0750	0.0469	0.8703	0.0725
RAS6	0.0820	0.0804	0.0767	0.0750	0.0750	0.0750	0.0625	0.0718	0.0750	0.0750	0.0750	0.0469	0.8703	0.0725
RAS7	0.0273	0.2411	0.2301	0.2250	0.2250	0.2250	0.1875	0.2154	0.2250	0.2250	0.2250	0.1406	2.3921	0.1993
RAS8	0.0492	0.1339	0.1278	0.1250	0.1250	0.1250	0.1042	0.1197	0.1250	0.1250	0.1250	0.0781	1.3630	0.1136
RAS9	0.0820	0.0804	0.0767	0.0750	0.0750	0.0750	0.0625	0.0718	0.0750	0.0750	0.0750	0.0469	0.8703	0.0725
RAS10	0.0820	0.0804	0.0767	0.0750	0.0750	0.0750	0.0625	0.0718	0.0750	0.0750	0.0750	0.0469	0.8703	0.0725
RAS11	0.0820	0.0804	0.0767	0.0750	0.0750	0.0750	0.0625	0.0718	0.0750	0.0750	0.0750	0.0469	0.8703	0.0725
RAS12	0.0820	0.0089	0.0767	0.0750	0.0750	0.0750	0.0625	0.0718	0.0750	0.0750	0.0750	0.0469	0.7988	0.0666
														1.0000

Matriz de Consistencia

	RAS1	RAS2	RAS3	RAS4	RAS5	RAS6	RAS7	RAS8	RAS9	RAS10	RAS11	RAS12	Suma Ponderada (Sp)	Vector Prior. (Vp)	Sp/Vp
RAS1	0.0305	0.0346	0.0047	0.0242	0.0242	0.0242	0.1993	0.0631	0.0242	0.0242	0.0242	0.0222	0.4995	0.0392	12.7388
RAS2	0.1176	0.1038	0.1272	0.0725	0.0725	0.0725	0.0664	0.0681	0.0725	0.0725	0.0725	0.5991	1.5174	0.1038	14.6229
RAS3	0.3529	0.0346	0.0424	0.0242	0.0242	0.0242	0.0221	0.0227	0.0242	0.0242	0.0242	0.0222	0.6420	0.0424	15.1408
RAS4	0.1176	0.1038	0.1272	0.0725	0.0725	0.0725	0.0664	0.0681	0.0725	0.0725	0.0725	0.0666	0.9849	0.0725	13.5806
RAS5	0.1176	0.1038	0.1272	0.0725	0.0725	0.0725	0.0664	0.0681	0.0725	0.0725	0.0725	0.0666	0.9849	0.0725	13.5806
RAS6	0.1176	0.1038	0.1272	0.0725	0.0725	0.0725	0.0664	0.0681	0.0725	0.0725	0.0725	0.0666	0.9849	0.0725	13.5806
RAS7	0.0392	0.3113	0.3816	0.2176	0.2176	0.2176	0.1993	0.2044	0.2176	0.2176	0.2176	0.1997	2.6410	0.1993	13.2488
RAS8	0.0706	0.1730	0.2120	0.1209	0.1209	0.1209	0.1107	0.1136	0.1209	0.1209	0.1209	0.1109	1.5160	0.1136	13.3477
RAS9	0.1176	0.1038	0.1272	0.0725	0.0725	0.0725	0.0664	0.0681	0.0725	0.0725	0.0725	0.0666	0.9849	0.0725	13.5806
RAS10	0.1176	0.1038	0.1272	0.0725	0.0725	0.0725	0.0664	0.0681	0.0725	0.0725	0.0725	0.0666	0.9849	0.0725	13.5806
RAS11	0.1176	0.1038	0.1272	0.0725	0.0725	0.0725	0.0664	0.0681	0.0725	0.0725	0.0725	0.0666	0.9849	0.0725	13.5806
RAS12	0.1176	0.0115	0.1272	0.0725	0.0725	0.0725	0.0664	0.0681	0.0725	0.0725	0.0725	0.0666	0.8927	0.0666	13.4093
													$\lambda_{m\acute{a}x}$		13.6660

Obtención del Índice de Consistencia (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Siendo n el número de indicadores cuya ponderación se pretende verificar su consistencia, n=8

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{13,6660 - 12}{12 - 1} = 0,15145$$

Con el valor de n, se obtiene el índice de consistencia medio, según la propuesta de (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

	n													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ICA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Fuente: (AGUARÓN, ESCOBAR , & MORENO-JIMÉNEZ, Stability Intervals for a judgement in AHP Decision Support Systems, 2001)

$$ICA(n) = 1,535$$

Sustituyendo en la expresión siguiente, se obtiene (RC).

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

$$RC = \frac{0,15145}{1,535} = 0,0986$$

Con lo que el valor obtenido es inferior a 0,10 cumpliendo así la condición de validez de los valores: $RC \leq 0,10$ (Consistencia razonable).

Indicador	Puntuación inicial	Priorización PAJ
RAS1	0,78	3,92%
RAS2	0,33	10,38%
RAS3	0,11	4,24%
RAS4	0,33	7,25%
RAS5	0,33	7,25%
RAS6	0,33	7,25%
RAS7	1,00	19,93%
RAS8	0,56	11,36%
RAS9	0,33	7,25%
RAS10	0,33	7,25%
RAS11	0,33	7,25%
RAS12	0,33	6,66%

A.3.3. Esquema de construcción de indicadores

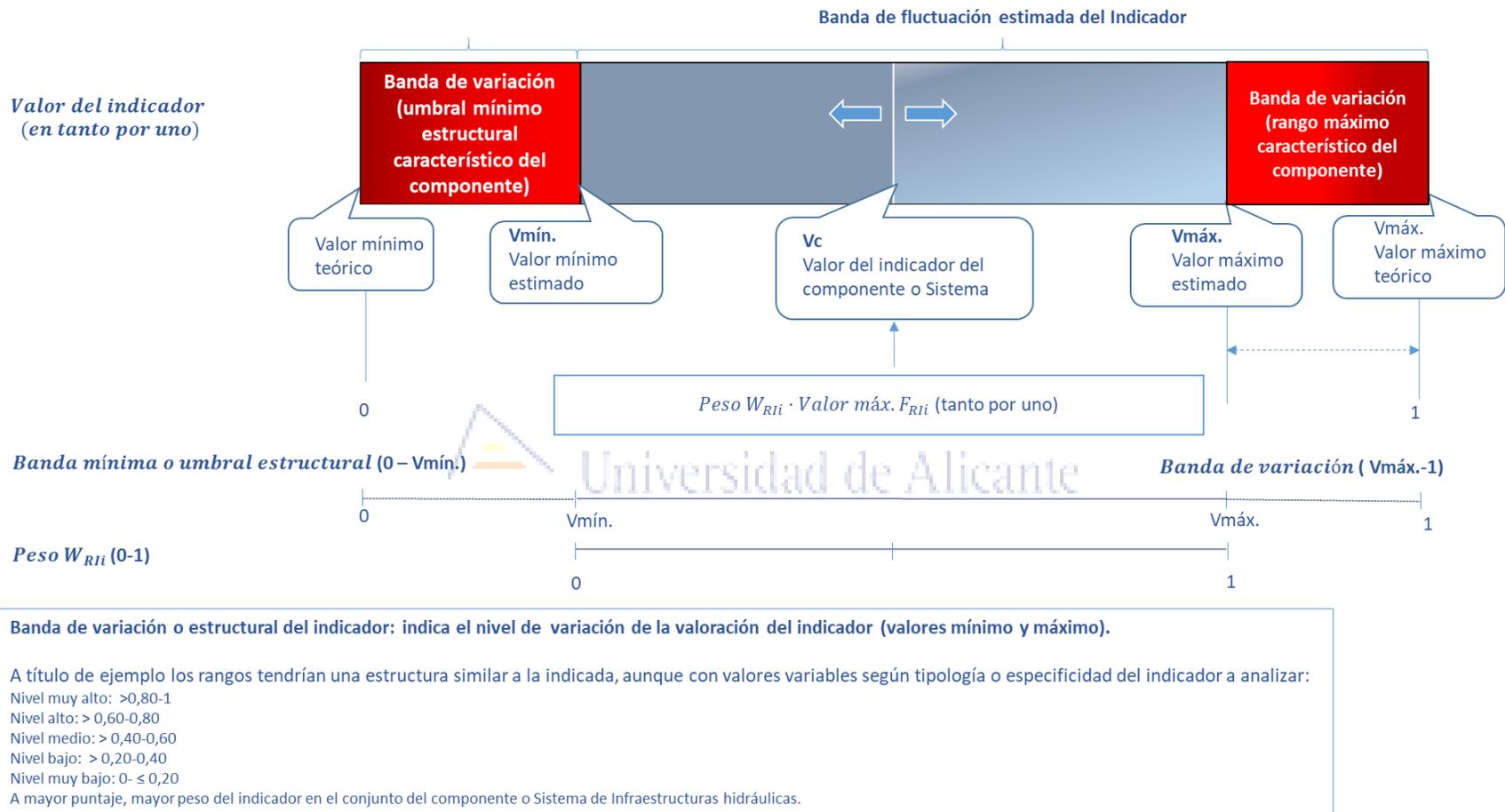


Figura 36 Esquema de Construcción de Indicadores. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4: Tipologías de mantenimiento de Redes

A continuación se clasifican y describen las diversas tipologías de mantenimiento existentes en un Sistema de Infraestructuras hidráulicas-Redes, Los diferentes grados propuestos se han considerado en base a la información recopilada en Abastecimientos de diferentes zonas del mundo (España, Francia, Nueva Zelanda, Sudáfrica,...), además de diversas investigaciones analizadas, tal es el caso de Liemberger R., (2007), Lambert A. and Mckenzie R., (2002), y New Zealand Water& Wastes Association, (2002), entre otras.

A.4.1. Red de abastecimiento.

GRADO 1	D-Muy pobre	Uso ineficiente de los recursos; necesidad prioritaria de implantar un programa de reducción de NRW.
GRADO 2	C-Pobre	Aceptable en caso de agua abundante y barata; con intensificación de esfuerzos de reducción de NRW.
GRADO 3	C-Medio bajo	Se considera la gestión de la presión, el control de fugas en la mejora de activos, y un mayor grado de mantenimiento preventivo
GRADO 4	B-Medio alto	Se considera la gestión de la evolución de la presión y el consumo, el control exhaustivo de fugas en la mejora de activos, y una evolución del grado de mantenimiento predictivo.
GRADO 5	B-Bueno	Implantación de un Plan de Gestión de Control Activo de Fugas. Identificación y análisis de la reducción de pérdidas. Estudio económico de su evolución, y su impacto en el Sistema, con una visión integral.
GRADO 6	A-Excelente	Gestión Eficiente e Integral del Sistema. El análisis de reducción de pérdidas puede ser antieconómico, pero hay que considerar otros aspectos (energéticos, medioambientales, sociales, y políticos), por lo que es necesario una planificación integral que identifique y seleccione las mejoras óptimas en base a la Sostenibilidad, la economía circular y la escasez de recursos naturales, en un marco de Cambio climático global.

A.4.2. Red de alcantarillado.

GRADO 1 Mantenimiento Correctivo.	D-Muy pobre	<p>Uso ineficiente de los recursos.</p> <p>Se observa solo la limpieza en caso de incidencias.</p> <p>Necesidad prioritaria de implantar un programa de limpieza de la red.</p>
GRADO 2 Mantenimiento Preventivo.	C-Pobre	<p>No se analizan las causas de las incidencias, aunque hay un Plan de limpiezas programadas.</p> <p>Utilización de tecnologías avanzadas para la limpieza y restauración de tramos deteriorados. Necesidad de investigar las causas y mayor desarrollo de las acciones preventivas.</p>
GRADO 3 Mantenimiento Preventivo avanzado.	C-Medio	<p>Planificación de las limpiezas en base a análisis de operación de la red.</p> <p>Análisis de la operación de la red, y desarrollo de planes de rehabilitación de tuberías en base a la inspección mediante cámaras de TV.</p> <p>Empleo de software específico de programación y análisis de incidencias.</p>
GRADO 4 Mantenimiento Predictivo.	B-Bueno	<p>Incorporación de equipos de control, medida y alerta.</p> <p>Modelo matemático de operación de la red de saneamiento.</p> <p>Existencia de un Plan de Gestión de la Red de Saneamiento.</p> <p>Se realiza un análisis económico de las operaciones de mantenimiento y programación de inversiones. (Gestión de Activos).</p> <p>Se considera el análisis integral de la operación y la planificación predictiva para el incremento de la eficiencia.</p> <p>Necesidad de investigar y analizar las incidencias físicas y operativas de la red. Necesidad de estudios de vulnerabilidad relativos a la degradación de materiales y riesgos, así como diseños eficientes.</p> <p>Implantación de la resiliencia de la red de saneamiento.</p>
GRADO 5 Mantenimiento Proactivo.	A-Excelente	<p>Se contempla la Gestión Eficiente e Integral del Sistema.</p> <p>Se dispone de modelación matemática avanzada y dinámica de las cuencas hidráulicas y sus componentes esenciales (colectores, cámaras de inspección, desagües, y demás equipamientos).</p> <p>Integración de software de análisis y mantenimiento, en la operación de la red de alcantarillado.</p> <p>Desarrollo de la resiliencia del Sistema de Saneamiento (Unitario y/o Separativo).</p> <p>Planificación proactiva de la Gestión del Sistema de Saneamiento, incorporando medidas eficientes de adaptación al cambio climático. (Sostenibilidad y Resiliencia del Sistema de Saneamiento).</p> <p>Hacia una economía circular Integral del Sistema.</p>

Anexo 5: Evolución y seguimiento de la Gestión de Riesgos

Para el control y seguimiento de los riesgos, se considera el Indicador de Gestión de Riesgos, DRMi Carreño M.L. Cardona O.D. Barbat A.H (2006), como indicador, de medición del desempeño basado a su vez en unos indicadores representativos de la gestión del Sistema, que plantea una escala de niveles y valores ponderados para realizar un seguimiento de la evolución de dicha gestión.

A continuación, se muestra la metodología desarrollada que representa un nuevo enfoque de la descrita por Banco Interamericano de Desarrollo, BID, (2015).

Dado el nivel de aplicación en este caso, y los objetivos buscados de desarrollar la resiliencia en la gestión integral y sostenible de la infraestructura, incorporando los riesgos hidrológicos y geológicos zonales que caracterizan al Sistema de Infraestructuras Hidráulicas Urbanas, se analizan determinados parámetros para la obtención de los indicadores físicos y operacionales representativos del Sistema, en base a enfoques, tanto determinísticos como estocásticos, y como se ha indicado con un enfoque integral.

La estructuración en indicadores consistentes Munda G., (2003), permite un desarrollo evolutivo que redundará en el planteamiento de un modelo matemático de comportamiento. Los indicadores deberán cumplir unas condiciones para que representen de una manera objetiva y efectiva, el Sistema que se quiere analizar J.R.C.-E.C., (2003), por lo que los indicadores propuestos, deberán considerar los siguientes aspectos:

- El marco teórico.
- Las características del Sistema.
- La selección de parámetros.
- Un análisis de correlación de parámetros.
- La metodología de normalización.
- El criterio o técnica de ponderación.
- El análisis de sensibilidad de parámetros propuestos.
- La propuesta de estrategias de sostenibilidad del Sistema.

Las técnicas para el análisis de los indicadores representativos del Sistema pueden variar según el planteamiento, y no hay una técnica específica comúnmente aceptada. En la actualidad hay diversas técnicas que pueden ser utilizadas que ofrecen diferentes ventajas y desventajas. Algunas de estas técnicas son las indicadas a continuación:

- Las técnicas de agregación.
- Los análisis de regresión lineal múltiple.
- El análisis de componentes principales o de factores.
- El análisis de la frontera eficiente.
- La opinión de expertos mediante la asignación de pesos a los indicadores representativos.
- La distancia a objetivos fijados.
- La opinión pública.
- Procesos analíticos jerárquicos.
- Conjuntos difusos, es decir que no tienen límites perfectamente definidos. La transición entre la pertenencia y no-pertenencia de una variable a un conjunto es gradual, aportando flexibilidad en la modelización.

En la metodología propuesta propone la utilización de técnicas agregadas en la obtención del Indicador de Gestión de Riesgos (IGR, o DRMi en inglés "Disasters Risk Management Index"), teniendo en cuenta los diferentes criterios de asignación de factores de importancia, de combinación de indicadores y los análisis de incertidumbre y sensibilidad que se describen en Cardona et al., (2004).

Actualmente no existen indicadores específicos, que sean ampliamente aceptados, para evaluar directamente el desempeño de la gestión del riesgo u otros aspectos relevantes que reflejen lo que se

desea medir como gestión del riesgo. El establecimiento de criterios que fijen las escalas de niveles de desempeño, Davis I., (2003); Masure P., (2003), o valores umbrales, como referente, definidos por variables, resulta esencial, Benson C., (2003b); Briguglio L., (2003a); Briguglio L., (2003b), y Mitchell T., (2003).

Es por ello, que cada indicador de riesgo se clasifica en cinco niveles de desempeño en orden creciente (bajo (1), incipiente (2), apreciable (3), notable (4) y óptimo (5), asignado a cada indicador un peso fijado por expertos y según la experiencia, que representa la importancia relativa de los aspectos que se evalúan.

El indicador de gestión de riesgos, $DRMi$, que obedece a la estrategia de Sostenibilidad del Sistema, se obtiene del promedio de los cinco indicadores principales que se describen a continuación:

- Caracterización física del Sistema e Identificación de amenazas (CIA).
- Acciones de incremento de la resiliencia (AIR).
- Análisis de la vulnerabilidad y Planeamiento de gestión de riesgos (APR).
- Implantación de acciones para la garantía de servicio (AGS).
- Implantación de acciones y desarrollo de la Sostenibilidad (ADS).

$$IGR_T \text{ o } DRMi = [IGR_{CIA} + IGR_{AIR} + IGR_{APR} + IGR_{AGS} + IGR_{ADS}]$$

Se plantean 5 subindicadores que definen cada uno de los subindicadores que a su vez caracterizan cada indicador principal, definiendo así las acciones y desarrollos realizados en la Gestión de Riesgos. Dichos indicadores e indicadores se describen y valoran seguidamente:

$$IGR_{T(CIA,AIR,APR,AGS,ADS)}^p = \sum_{i=1}^N w_i I_i^p$$

Siendo:

N = nº de subindicadores de cada indicador principal.

w_i , es el peso asignado a cada indicador.

I_i^p , es el indicador específico durante el periodo t normalizado considerado, cuyo valor varía de 0 a 5, clasificándose como (1) bajo, (2) medio bajo, (3) medio alto, (4) alto, y (5) óptimo, según diferentes funciones de pertenencia, del tipo,

$$\text{Función bell } (x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}}$$

Donde, el parámetro b es normalmente positivo, de tipo sigmoïdal variando entre los valores 1 y 5.

$$\text{Función Sigmoïdal } (x; a, c) = \frac{1}{1 + \exp[-a(x - c)]}$$

El parámetro a define la pendiente en el punto 0,5; $x=c$.

El Indicador Total de Gestión del Riesgo IGR_T o $DRMi$, correspondería al promedio de los cinco indicadores principales obtenidos.

Los niveles de calificación o desempeño, y las funciones de pertenencia se representan en la siguiente gráfica:

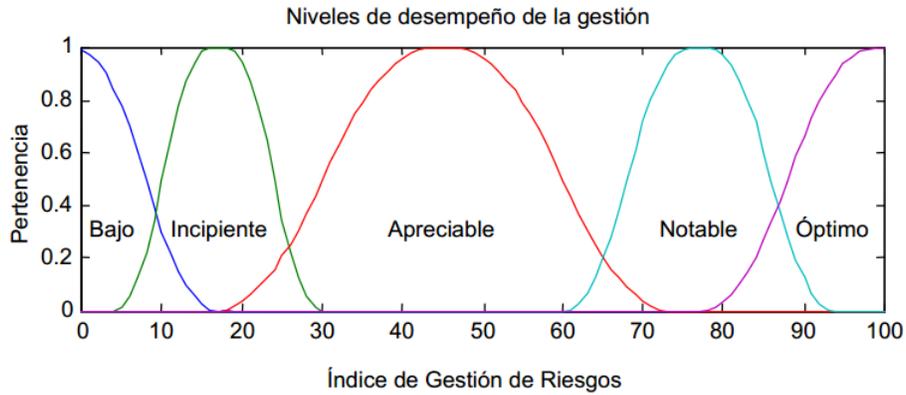


Figura 37 Niveles de desempeño e Índice de Gestión de Riesgos. Fuente: Información e Indicadores de Riesgo y Gestión de Riesgos. BID, CEPAL e IDEA, 2003-2005.

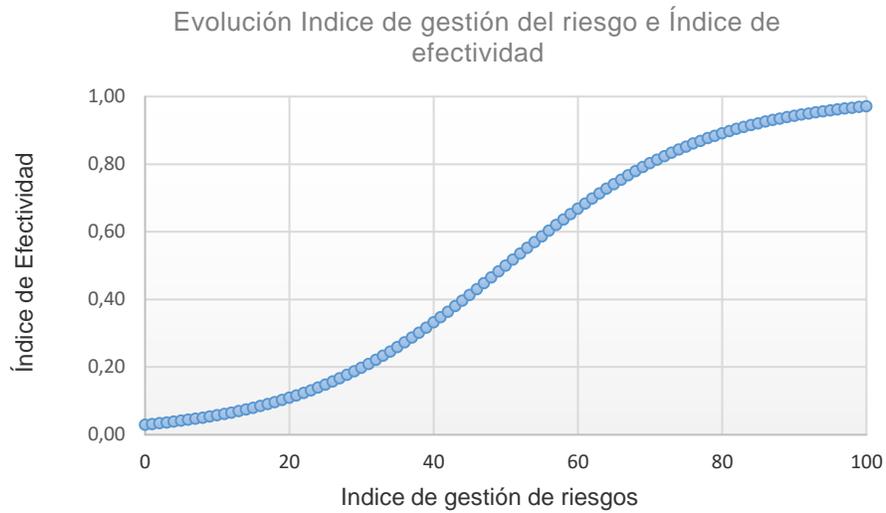


Figura 38 Curva de evolución del indicador de gestión y de efectividad. Fuente: elaboración propia.

Como desarrollo de la metodología propuesta se enumeran y describen los Indicadores de seguimiento de cada indicador principal enumerado anteriormente, de la Gestión de Riesgos:

A. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SISTEMA E IDENTIFICACIÓN DE AMENAZAS (C.I.A.).

- a.1) Desarrollo de inventario y caracterización del Sistema. (BID, 2003-2005)
- a.2) Identificación de amenazas y peligros potenciales zonales.
- a.3) Caracterización de procesos de operación del Sistema.
- a.4) Análisis de la confiabilidad de operación del Sistema.
- a.5) Grado de integración de la información en plataforma GIS.

IGR_{CIA}	Indicador	I Valor (1-5)	Peso (w) [Σ Factor ponderación (0-1)]	Total (w_{DS} · IDS)
a.1) Desarrollo de inventario y caracterización del Sistema	CIA1	I _{CI1}	w _{CI1}	I _{CI1} · w _{CI1}
a.2) Identificación de amenazas y peligros potenciales zonales	CIA2	I _{CI2}	w _{CI2}	I _{CI2} · w _{CI2}
a.3) Caracterización de procesos de operación del Sistema	CIA3	I _{CI3}	w _{CI3}	I _{CI3} · w _{DS3}
a.4) Análisis de la confiabilidad de operación del Sistema	CIA4	I _{CI4}	w _{CI4}	I _{CI4} · w _{DS4}
a.5) Grado de integración de la información en plataforma GIS	CIA5	I _{CI5}	w _{CI5}	I _{CI5} · w _{DS5}
	Total, CIA	Σ I_{CI}	Σ w_{CI}	IGR_{CIA} = Σ I_{CI} · w_{CI}

B. ACCIONES DE INCREMENTO DE LA RESILIENCIA (A.I.R.).

- b.1) Implantación de Planes de renovación de redes.
- b.2) Grado de monitorización de la infraestructura hidráulica.
- b.3) Grado de planificación e implantación de dispositivos resilientes.
- b.4) Desarrollo y potenciación del grado de mantenimiento.
- b.5) Desarrollo de la cultura preventiva.

IGR_{AIR}	Indicador	I Valor (1-5)	Peso (w) [Σ Factor ponderación (0-1)]	Total (w_{DS} · IDS)
b.1) Implantación de Planes de renovación de redes	AIR1	I _{IR1}	w _{IR1}	I _{IR1} · w _{IR1}
b.2) Grado de monitorización de la infraestructura hidráulica	AIR2	I _{IR2}	w _{IR2}	I _{IR2} · w _{IR2}
b.3) Grado de planificación e implantación de dispositivos resilientes	AIR3	I _{IR3}	w _{IR3}	I _{IR3} · w _{IR3}
b.4) Desarrollo y potenciación del grado de mantenimiento	AIR4	I _{IR4}	w _{IR4}	I _{IR4} · w _{IR4}
b.5) Desarrollo de la cultura preventiva	AIR5	I _{IR5}	w _{IR5}	I _{IR5} · w _{IR5}
	Total, AIR	Σ I_{IR}	Σ w_{IR}	IGR_{IR} = Σ I_{IR} · w_{IR}

C. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD Y PLANEAMIENTO DE LA GESTIÓN DE RIESGOS (A.P.R.).

- c.1) Desarrollo de Planes de Reducción de la vulnerabilidad.
- c.2) Desarrollo de indicadores de gestión del riesgo.
- c.3) Implantación de procedimientos operativos avanzados.
- c.4) Análisis de la evolución de indicadores de gestión del riesgo.
- c.5) Aplicación de estrategias de análisis e implantación de Planes de Gestión de Riesgos.

IGR_{APR}	Indicador	I Valor (1-5)	Peso (w) [\sum Factor ponderación (0-1)]	Total ($w_{DS} \cdot IDS$)
c.1) Desarrollo de Planes de Reducción de la vulnerabilidad	APR1	I_{PR1}	w_{PR1}	$I_{PR1} \cdot w_{PR1}$
c.2) Desarrollo de indicadores de gestión del riesgo	APR2	I_{PR2}	w_{PR2}	$I_{PR2} \cdot w_{PR2}$
c.3) Implantación de procedimientos operativos avanzados.	APR3	I_{PR3}	w_{PR3}	$I_{PR3} \cdot w_{PR3}$
c.4) Análisis de la evolución de indicadores de gestión del riesgo.	APR4	I_{PR4}	w_{PR4}	$I_{PR4} \cdot w_{PR4}$
c.5) Aplicación de estrategias de análisis e implantación de Planes de Gestión de Riesgos.	APR5	I_{PR5}	w_{PR5}	$I_{PR5} \cdot w_{PR5}$
	Total, APR	$\sum I_{PR}$	$\sum w_{PR}$	$IGR_{ADS} = \sum I_{PR} \cdot w_{PR}$

D. IMPLANTACIÓN DE ACCIONES PARA LA GARANTÍA DE SERVICIO (A.G.S.).

- d.1) Potenciación de políticas de gestión de activos.
- d.2) Aplicación de herramientas de gestión de cortes de suministro.
- d.3) Planificación de escenarios y desarrollo de alternativas.
- d.4) Implantación de software avanzado de gestión operativa.
- d.5) Implantación y potenciación de plataformas SIG.

IGR_{AGS}	Indicador	I Valor (1-5)	Peso (w) [\sum Factor ponderación (0-1)]	Total ($w_{GS} \cdot IGS$)
d.1) Potenciación de políticas de gestión de activos.	AGS1	I_{GS1}	w_{GS1}	$I_{GS1} \cdot w_{GS1}$
d.2) Aplicación de herramientas de gestión de cortes de suministro.	AGS2	I_{GS2}	w_{GS2}	$I_{GS2} \cdot w_{GS2}$
d.3) Planificación de escenarios y desarrollo de alternativas.	AGS3	I_{GS3}	w_{GS3}	$I_{GS3} \cdot w_{GS3}$
d.4) Implantación de software avanzado de gestión operativa.	AGS4	I_{GS4}	w_{GS4}	$I_{GS4} \cdot w_{GS4}$
d.5) Implantación y potenciación de plataformas SIG.	AGS5	I_{GS5}	w_{GS5}	$I_{GS5} \cdot w_{GS5}$
	Total, AGS	$\sum I_{GS}$	$\sum w_{GS}$	$IGR_{ADS} = \sum I_{GS} \cdot w_{GS}$

- E. IMPLANTACIÓN DE ACCIONES Y DESARROLLO DE LA SOSTENIBILIDAD (A.D.S.).
- e.1) Medidas de reducción de emisiones de CO2.
 - e.2) Implantación de medidas de eficiencia energética e hídrica.
 - e.3) Desarrollo e Implantación de medidas de fomento de la economía circular en la Infraestructura Hidráulica.
 - e.4) Fomento y divulgación de medidas para el uso eficiente del agua.
 - e.5) Desarrollo de estrategias que potencien la sostenibilidad.

IGR _{ADS}	Indicador	I Valor (1-5)	Peso (w)	Total ($w_{DS} \cdot IDS$)
			[\sum Factor ponderación (0-1)]	
e.1) Medidas de reducción de emisiones de CO2.	ADS1	I_{DS1}	w_{DS1}	$I_{DS1} \cdot w_{DS1}$
e.2) Implantación de medidas de eficiencia energética e hídrica.	ADS2	I_{PDS2}	w_{PDS2}	$I_{DS2} \cdot w_{DS2}$
e.3) Desarrollo e Implantación de medidas fomento de la economía circular en la Infraestructura Hidráulica.	ADS3	I_{DS3}	w_{DS3}	$I_{DS3} \cdot w_{DS3}$
e.4) Fomento y divulgación de medidas para el uso eficiente del agua.	ADS4	I_{DS4}	w_{DS4}	$I_{DS4} \cdot w_{DS4}$
e.5) Desarrollo de estrategias que potencien la sostenibilidad.	ADS5	I_{DS5}	w_{DS5}	$I_{DS5} \cdot w_{DS5}$
	Total, ADS	$\sum I_{DS}$	$\sum w_{DS}$	$IGR_{ADS} = \sum I_{DS} \cdot w_{DS}$

Siendo la expresión general del Índice de Gestión de Riesgos, que permitirá desarrollar la Sostenibilidad del Sistema, la que se indica a continuación:

$$IGR_T \text{ o } DRMi = [IGR_{CIA} + IGR_{AIR} + IGR_{APR} + IGR_{AGS} + IGR_{ADS}]$$

$$IGR_{T(CIA,AIR,APR,AGS,ADS)}^p = \sum_{i=1}^N w_i I_i^p$$

Siendo:

N = nº de subindicadores de cada indicador principal.

w_i , es el peso asignado a cada indicador.

I_i^p , es el indicador específico durante el periodo t normalizado considerado, cuyo valor varía de 0 a 5, clasificándose como (1) bajo, (2) medio bajo, (3) medio alto, (4) alto, y (5) óptimo, según diferentes funciones de pertenencia. Carreño et al., (2005c)

Anexo 6: Mapas de Amenazas

A.6.1. Amenaza Hidrológica

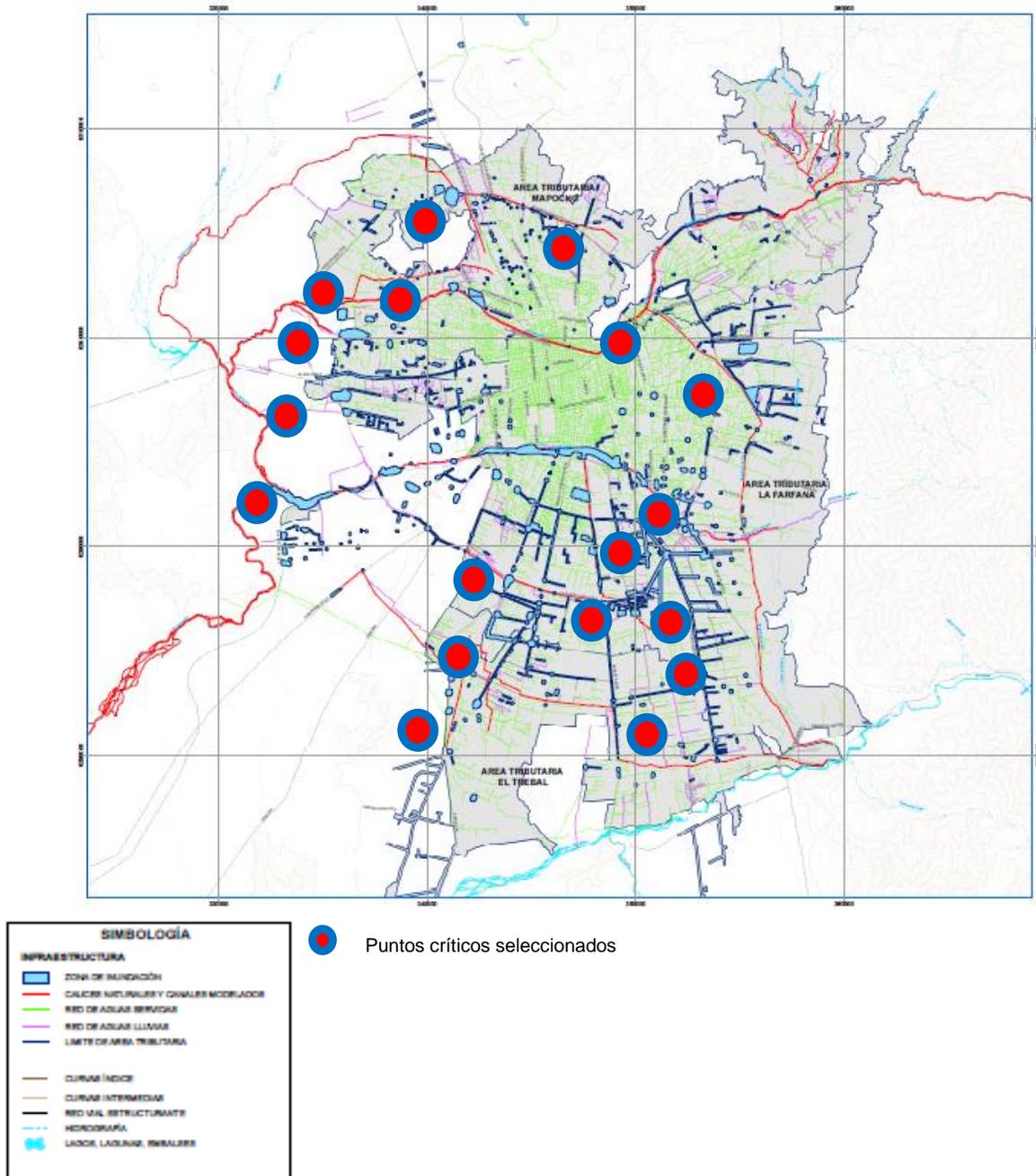


Figura 39 Zonificación de puntos críticos de inundación en Santiago.
Fuente: Elaboración propia en base a datos de episodios históricos.

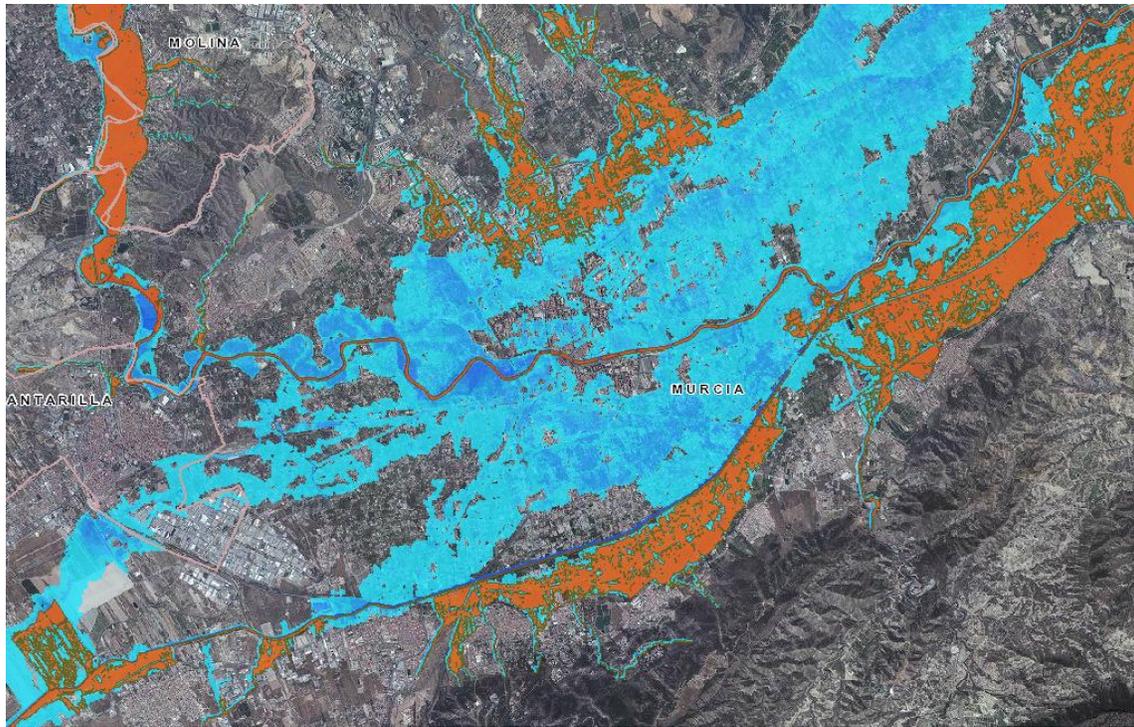


Figura 40 Área potencial de riesgo de inundación de origen fluvial y calados para un periodo de retorno T: 100años. Fuente: Sitmurcia.

A.6.2. Amenaza de Remociones en Masa.

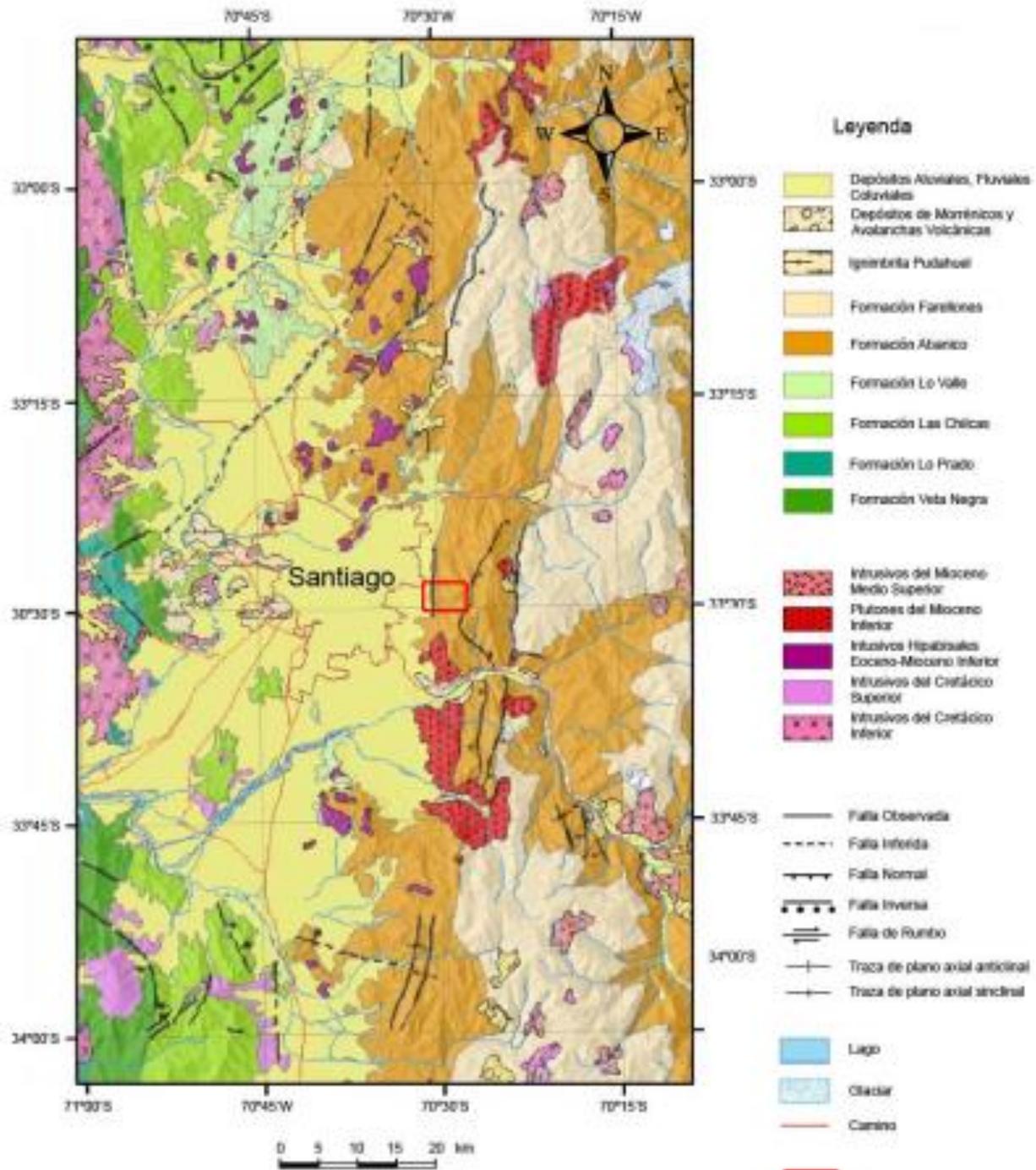


Figura 41 Mapa Geológico Regional. (Fock A., 2005).



Figura 42 Imagen satelital de los Andes, Chile Central, y la Cuenca de Santiago. Quebrada de Ramón.
Fuente: Contreras Vargas, M.T., (2016).


 Universitat d'Alacant
 Universidad de Alicante

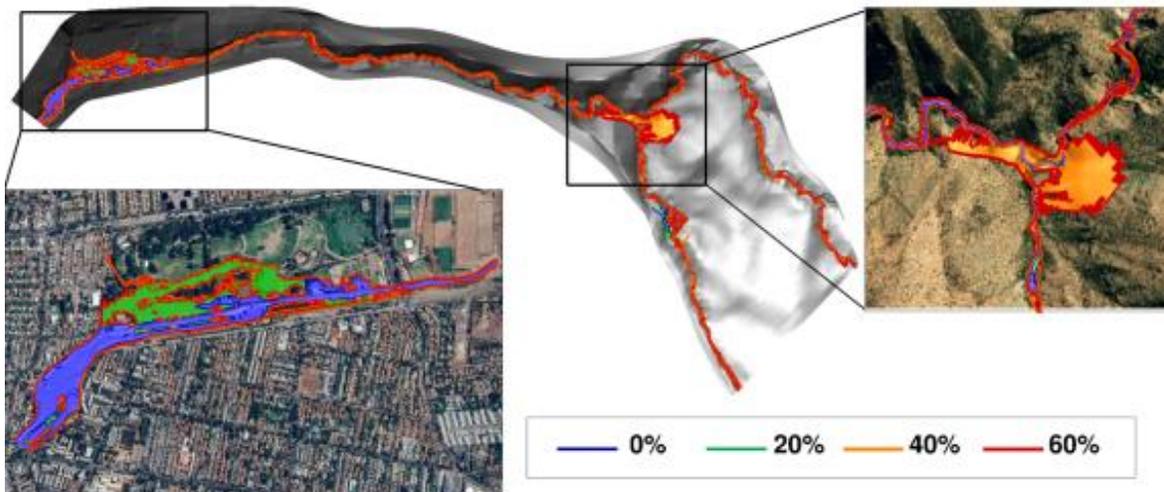


Figura 43 Área inundada y concentración de sedimentos. Zona Oriental de Santiago, Quebrada de Ramón. Fuente: Contreras Vargas, M.T., 2016

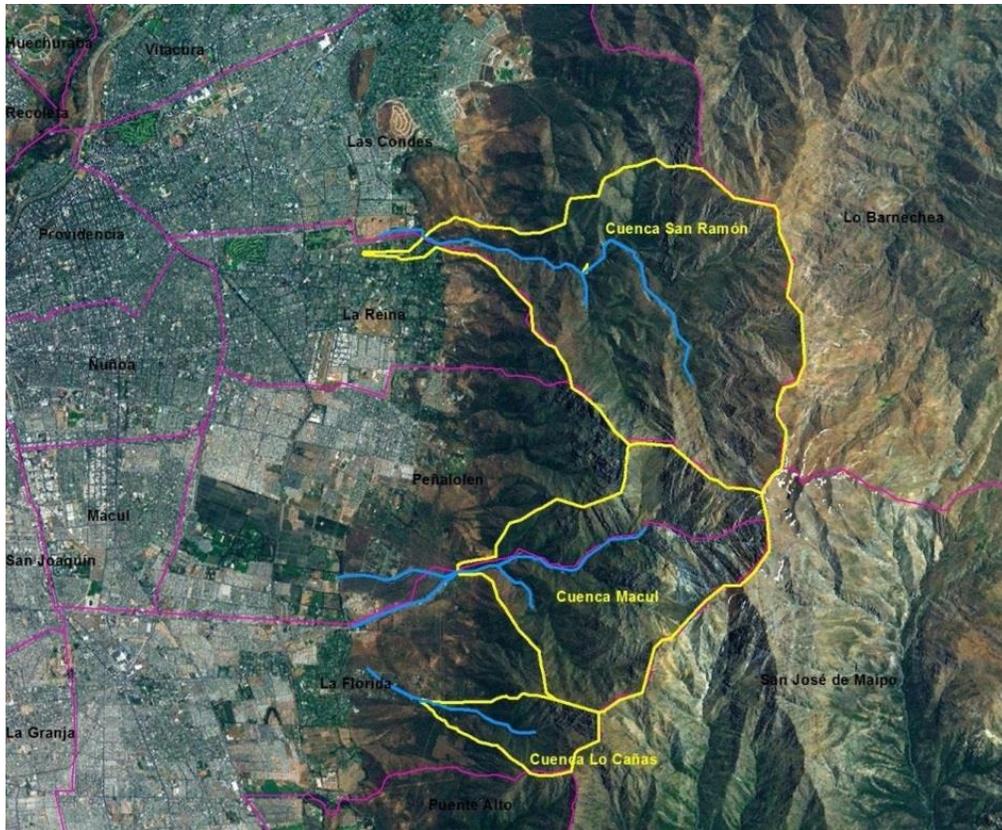


Figura 44 Zonas de afección por flujo de detritos, en Santiago, febrero 1980.
Fuente: Catastro Nacional de Desastres Naturales, Período 1980-2015. SERNAGEOMÍN.

A.6.3. Amenaza Sísmica.

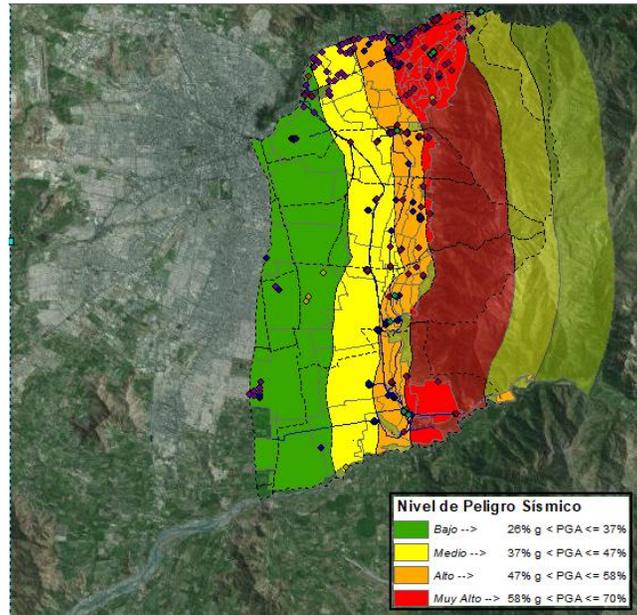


Figura 45 Zonificación de la amenaza Sísmica. Falla San Ramón, en la zona Oriental de Santiago, 2018. Localización de la Infraestructura hidráulica. Fuente: Elaboración propia.

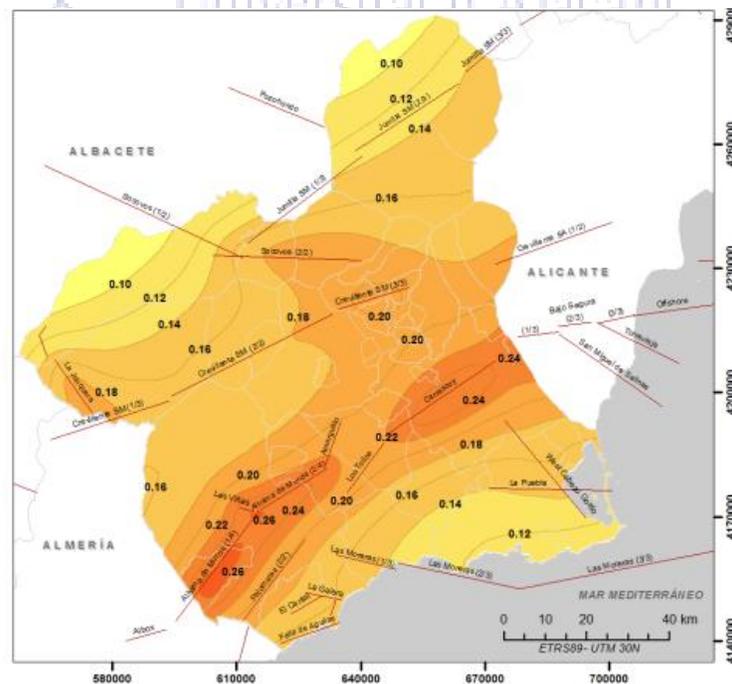


Figura 46 Mapa de amenaza Sísmica de la Región de Murcia para un periodo de retorno T: 475 años. Aceleraciones PGA (g) en roca. Fuente: SISIMMUR 2015. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM).

A.6.4. Amenaza Volcánica

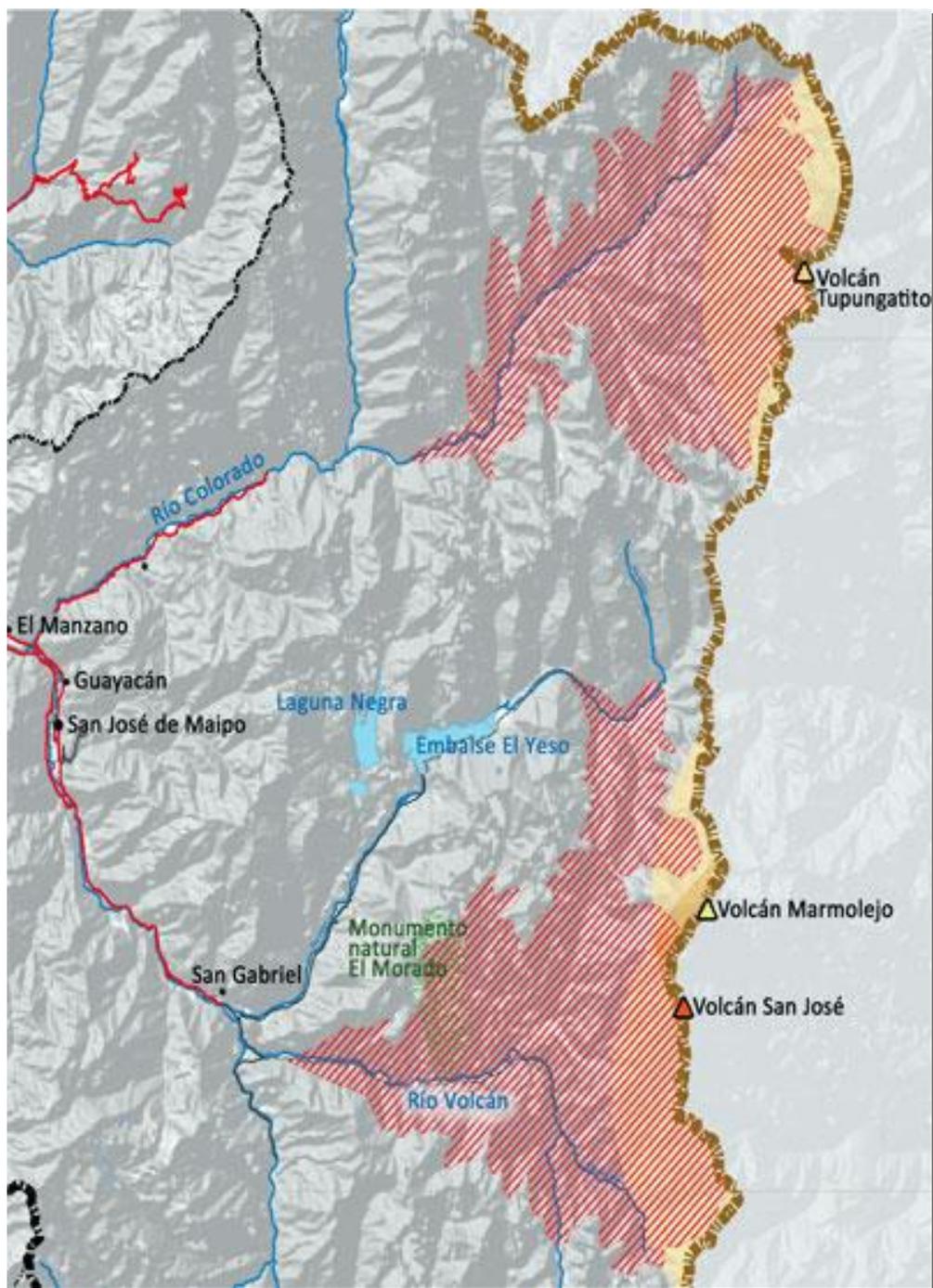


Figura 47 Mapa de amenaza volcánica con afectación potencial de la Región Metropolitana (RM).
Fuente: SERNAGEOMIN.

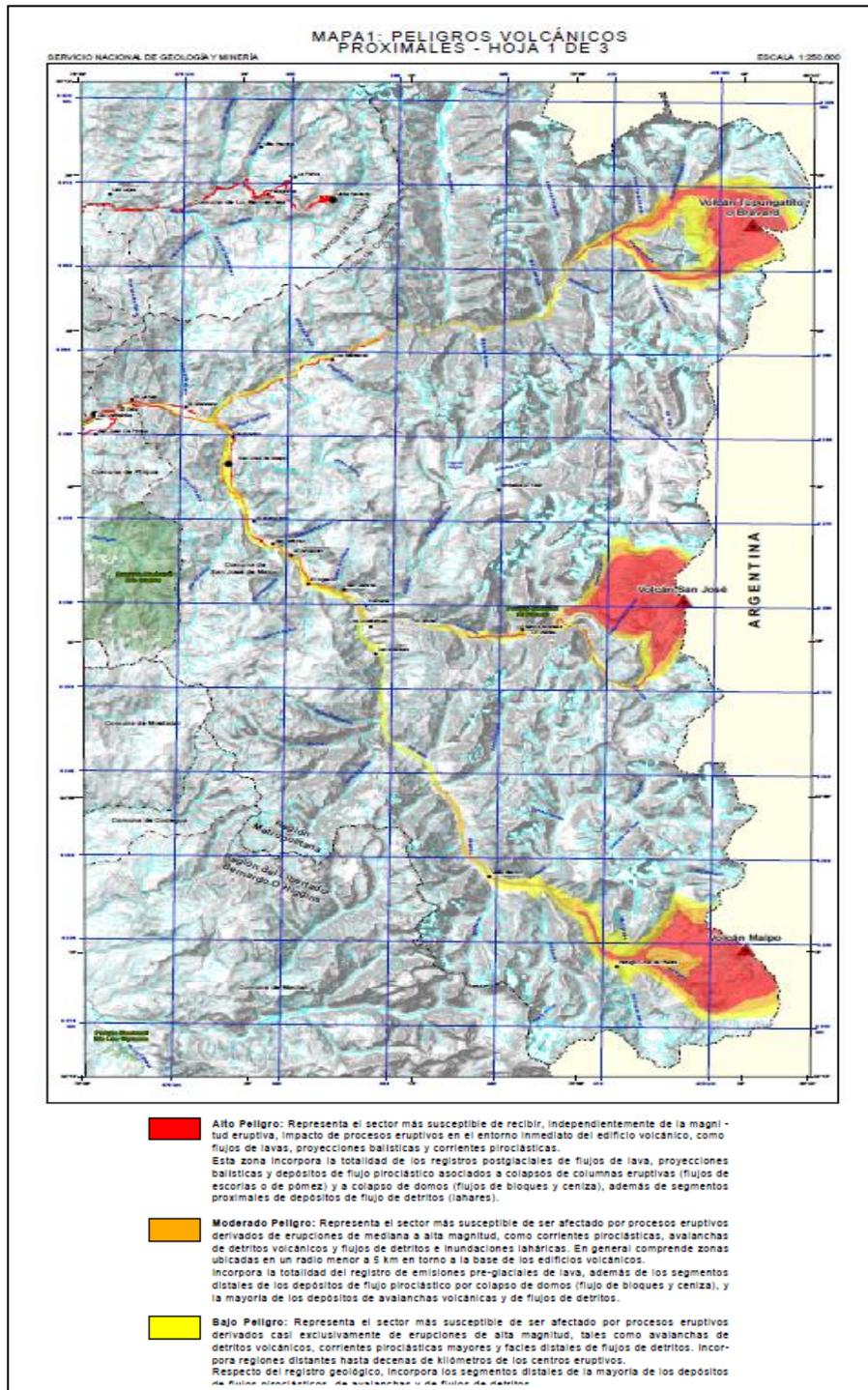


Figura 48 Mapas de amenaza volcánica en la Región Metropolitana.
Fuente: SERNAGEOMÍN.

Anexo 7: Indicadores de Susceptibilidad

A.7.1. Indicadores de Susceptibilidad física

A.7.1.1. Susceptibilidad física del sistema de abastecimiento

En la Tabla 99 se presentan los indicadores de susceptibilidad física de los acueductos (AC), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de los acueductos (AC) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 99 Indicadores de susceptibilidad física de los acueductos (AC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
I_{sfAC1}	Antigüedad (años)/Tipo de material. (A/M).	Define tipología de material y antigüedad. Se le asigna un valor para cada tipo de material y su antigüedad respectiva, ponderada en relación con la longitud específica de cada uno.
I_{sfAC2}	Nº de derivaciones con unión flexible/Tramo acueducto (km)	Se refiere al número de derivaciones con unión flexible (absorción de movimientos) existentes en la longitud del tramo de acueducto. La unión del acueducto y la derivación es en sí misma un punto crítico, debido al cambio de rigidez de los elementos.
I_{sfAC3}	Nº cámaras de inspección/Longitud tramo (km)	Refleja las cámaras de inspección por tramo de acueducto, lo que permite verificar posibles incidencias y acciones de alternativas. Así mismo, definen un punto crítico de transición debido al cambio de rigidez entre ambos elementos (cámara y tramo).
I_{sfAC4}	Pendiente hidráulica (m/m).	Define el desnivel del tramo de acueducto o la pendiente media del acueducto. Se mide asignando un valor a cada tramo de pendiente hidráulica (a menor pendiente mayor valor asignado, y viceversa).

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 100 Rangos y valores de Indicadores de susceptibilidad física de los acueductos (AC).

I_{sfAC1}	Rango	Puntuación	Antigüedad-A (años)	Puntuación	Material-M	Puntuación
	$r1=0$	1,00	$A > 100$	1,00	Acero	1
	$0 < r2 \leq 5$	0,85	$75 < A \leq 100$	0,90	HA	2
	$5 < r3 \leq 10$	0,70	$50 < A \leq 75$	0,70	HS	3
	$10 < r4 \leq 15$	0,55	$25 < A \leq 50$	0,50	FFG	4
	$15 < r5 \leq 20$	0,40	$15 < A \leq 25$	0,30	AC	5
	$20 < r6 \leq 25$	0,25	$5 < A \leq 15$	0,20		
	$25 < r7 \leq 35$	0,10	$A \leq 5$	0,10		
	$r8 \geq 35$	0,00				
	Peso	Ponderación (%)				
W_{sfAC1}	15,60					

I _{SfAC2}	Rango	Puntuación	I _{SfAC3}	Rango	Puntuación	I _{SfAC4}	Rango	Puntuación
	r1=0	1		r1=0	0,1		r1=0	0,1
	0< r2≤ 5	0,85		0< r2≤ 5	0,15		0< r2≤ 0,02	0,25
	5<r3≤ 10	0,7		5<r3≤ 10	0,4		0,02<r3≤ 0,05	0,4
	10< r4≤ 15	0,55		10< r4≤ 15	0,55		0,05< r4≤ 0,075	0,55
	15<r5≤ 20	0,4		15<r5≤ 20	0,7		0,075<r5≤ 0,10	0,7
	20<r6≤ 25	0,25		20<r6≤ 25	0,85		0,10<r6≤ 0,15	0,85
	r7>25	0,1		r7>25	1		r7>0,15	1
	Peso	Ponderación (%)		Peso	Ponderación (%)		Peso	Ponderación (%)
W _{SfAC2}	11,06	W _{SfAC3}	13,98	W _{SfAC4}	15,66			

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 101 se presentan los indicadores de susceptibilidad física de las captaciones superficiales (CS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de las captaciones superficiales (CS) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 101 Indicadores de susceptibilidad física de las captaciones superficiales (CS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
<i>I_{SfCS1}</i>	Grado de implantación de cuadros eléctricos equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación.	Define el grado de implantación de equipamiento eléctrico de maniobra y gestión de los equipos electromecánicos de la instalación. Para su valoración se establecen rangos de medición, basados en la tipología de equipos, calidades y prestaciones.
<i>I_{SfCS2}</i>	La antigüedad (años) en relación con la naturaleza material o tipología constructiva de la instalación (HS-HA). (A/M)	Se refiere a la antigüedad y la naturaleza material de la instalación (obra civil). Se mide asignando valores a cada rango establecido.
<i>I_{SfCS3}</i>	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería.	Define el grado de implantación de equipamiento hidráulico avanzado, calderería y accesorios de la instalación. Se mide asignando valores por rango establecido.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 102 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de las captaciones superficiales (CS).

I_{sfCS1}	Rango	Puntuación	I_{sfCS2}	Rango	Puntuación	I_{sfCS3}	Rango	Puntuación
	$r1=0$	1,00		$r1=0$	0,00		$r1=0$	0,1
	$0 < r2 \leq 0,20$	0,85		$0 < r2 \leq 5$	0,10		$0 < r2 \leq 5$	0,15
	$0,20 < r3 \leq 0,40$	0,70		$5 < r3 \leq 10$	0,30		$5 < r3 \leq 10$	0,4
	$0,40 < r4 \leq 0,60$	0,55		$10 < r4 \leq 15$	0,50		$10 < r4 \leq 15$	0,55
	$0,60 < r5 \leq 0,80$	0,40		$15 < r5 \leq 20$	0,70		$15 < r5 \leq 20$	0,7
	$0,80 < r6 \leq 1,00$	0,25		$20 < r6 \leq 25$	0,90		$20 < r6 \leq 25$	0,85
	$r7=1,00$	0,10		$25 < r7 \leq 35$	1,00		$r7 > 25$	1
	Peso	Ponderación (%)		Peso	Ponderación (%)		Peso	Ponderación (%)
	W_{sfCS1}	13,98		W_{sfCS2}	26,55		W_{sfCS3}	23,97

Antigüedad-A (años)	Puntuación	Material-M	Puntuación
$A > 100$	1,00	HA	1
$75 < A \leq 100$	0,90	HS	2
$50 < A \leq 75$	0,70		
$25 < A \leq 50$	0,50		
$15 < A \leq 25$	0,30		
$5 < A \leq 15$	0,20		
$A \leq 5$	0,10		

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 103 se presentan los indicadores de susceptibilidad física de los embalses (EMB) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de los embalses (EMB) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 103 Indicadores de susceptibilidad física de los embalses (EMB)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
I_{sfEMB1}	Antigüedad (años)/Naturaleza del material o tipología constructiva. (A/M).	Define la antigüedad de la instalación y la naturaleza del material o tipología constructiva. Se le asigna un valor para cada tipología de material o constructiva, y su antigüedad respectiva. Se miden a partir de toma de muestras y ensayos de caracterización y de resistencia mecánica.
I_{sfEMB2}	Nº y capacidad de desagüe /Nº y capacidad de desembalse de las compuertas o tomas.	Define la capacidad de desembalse y las alternativas de desagüe, en la operación normal, en base a la capacidad (Hm3) operativa del mismo. Para su valoración se establecen rangos de medición.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 104 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de los embalses (EMB).

I _{SIEMB1}	Rango	Puntuación	I _{SIEMB2}	Rango	Puntuación
	r1=0,10	0,00		r1=0	1
	0,10< r2≤ 0,20	0,10		0< r2≤ 0,20	0,85
	0,20<r3≤ 0,40	0,30		0,20<r3≤ 0,40	0,7
	0,40< r4≤ 0,60	0,50		0,40< r4≤ 0,60	0,55
	0,60<r5≤ 0,80	0,70		0,60<r5≤ 0,80	0,4
	0,80<r6< 1,00	0,90		0,80<r6< 1,00	0,25
	r7=1,00	1,00		r7=1	0,1
	Peso	Ponderación (%)		Peso	Ponderación (%)
	<i>W_{SfEMB1}</i>	13,75		<i>W_{SfEMB2}</i>	29,42

Antigüedad-A (años)	Puntuación
A > 100	1,00
75<A≤ 100	0,90
50<A≤ 75	0,70
25<A≤ 50	0,50
15<A≤ 25	0,30
5<A≤ 15	0,20
A≤ 5	0,10

Material-M	Puntuación
HS	2
HA	1

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 105 se presentan los indicadores de susceptibilidad física de los estanques (EST) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de los estanques (EST) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 105 Indicadores de susceptibilidad física de los estanques (EST)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I_{sf_{EST1}}$	La antigüedad (años) y material o tipología constructiva de la instalación (HS-HA). (A/M)	Se refiere a la antigüedad y la naturaleza material de la instalación (obra civil). Se le asigna un valor para cada tipo de material y su antigüedad respectiva. Se realizan ensayos de toma de muestras de caracterización de propiedades mecánicas. Se mide en base a rangos y asignando un valor.
$I_{sf_{EST2}}$	Tipología de estructura: Superficial, Semienterrado, elevado.	Se refiere a la tipología estructural de la instalación (superficial, semienterrada, o elevada). La tipología estructural es una característica, diferencial de la instalación, ya que influye en la operación, y mantenimiento de esta, así como en su gestión. Se mide según su caracterización física asignando un valor en cada caso.
$I_{sf_{EST3}}$	Nº de cámaras o vasos (N)	Indica la posibilidad de suministro alternativo, en caso de incidencia o mantenimiento de una de las cámaras. Se mide en base a rangos y asignando un valor.
$I_{sf_{EST4}}$	Existencia de by-Pass y/o descarga previa de cámaras.	Indica la posibilidad de suministro en caso de incidencia de una de las cámaras. Se mide en base a un valor asignado. Se asigna valor 0 si hay by-pass, y en caso contrario valor 1.
$I_{sf_{EST5}}$	Disponibilidad de cámara de cloración.	Se refiere a la posibilidad de aislamiento de los equipos de cloración y desinfección. Se mide en base a un valor asignado. Se asigna valor 0 si hay cámara de cloración, y en caso contrario valor 1.
$I_{sf_{EST6}}$	Disponibilidad de elementos de Prevención y Control Sanitario	Se refiere a la disponibilidad de equipamiento de prevención y control sanitario, que permita garantizar su no contaminación por agentes externos. Se mide en base a un valor asignado. Se asigna valor 0 si hay equipamiento específico, y en caso contrario valor 1.
$I_{sf_{EST7}}$	Tipo de instalación según caudal de entrada (m ³ /h).	Clasifica la instalación según el caudal de entrada en: Estanque tipo 1 ($Q_{entrada} \leq 100$), Estanques tipo 2 ($100 < Q_{entrada} < 500$), y Estanques tipo 3 ($Q_{entrada} \geq 500$). Se asigna un valor según tipo de estanque.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 106 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de los estanques (EST).

I _{SfEST1}	Rango	Puntuación
	r1=0,10	0,00
	0,10< r2≤ 0,20	0,10
	0,20<r3≤ 0,40	0,30
	0,40< r4≤ 0,60	0,55
	0,60<r5≤ 0,80	0,70
	0,80<r6≤ 1,00	0,90
	r7=1,00	1,00
	Peso	Ponderación (%)
	<i>W_{SfEST1}</i>	7,67

Antigüedad-A (años)	Puntuación	Material-M	Puntuación
A > 100	1,00	HA	1
75<A≤ 100	0,90	HS	2
50<A≤ 75	0,70		
25<A≤ 50	0,50		
15<A≤ 25	0,30		
5<A≤ 15	0,20		
A≤ 5	0,10		

I _{SfEST2}	Rango	Puntuación
	r1=Elevado	1,00
	r2=Superficial	0,85
	r3=Semienterrado	0,70
	Peso	Ponderación (%)
<i>W_{SfEST2}</i>	17,38	

I _{SfEST3}	Rango	Puntuación
	r1=1	1,00
	1< r2<2	0,50
	r3>2	0,10
	Peso	Ponderación (%)
<i>W_{SfEST3}</i>	13,84	

I _{SfEST4}	Rango	Puntuación
	r1=0	1
	r2=1	0
	Peso	Ponderación (%)
<i>W_{SfEST4}</i>	15,60	

I _{SfEST5}	Rango	Puntuación
	r1=0	1
	r2=1	0
	Peso	Ponderación (%)
<i>W_{SfEST5}</i>	8,87	

I _{SfEST6}	Rango	Puntuación
	r1=0	1
	r2=1	0
	Peso	Ponderación (%)
<i>W_{SfEST6}</i>	8,87	

I _{SfEST7}	Rango	Puntuación
	r1=0,5	0,00
	r2=1	0,50
	r3=2	1,00
	Peso	Ponderación (%)
<i>W_{SfEST7}</i>	7,49	

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 107 se presentan los indicadores de susceptibilidad física de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 107 Indicadores de susceptibilidad física de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I_{sf_{PEAP1}}$	Grado de implantación de cuadros eléctricos equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación.	Define el grado de implantación de equipamiento eléctrico de maniobra y gestión de los equipos electromecánicos de la instalación. Para su valoración se establecen rangos de medición, basados en la tipología de equipos, calidades y prestaciones.
$I_{sf_{PEAP2}}$	La antigüedad (años) y material o tipología constructiva de la instalación (HS-HA). (A/M).	Se refiere a la antigüedad y la naturaleza material de la instalación (obra civil). Se le asigna un valor para cada tipo de material y su antigüedad respectiva.
$I_{sf_{PEAP3}}$	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería-	Define el grado de implantación de equipamiento hidráulico avanzado, calderería y accesorios de la instalación.
$I_{sf_{PEAP4}}$	Clasificación por capacidad de bombeo (l/s): $Q_b \leq 100$, $100 < Q_b < 1000$, $Q_b \geq 1000$.	La instalación se clasifica por la capacidad de bombeo, estableciendo así su criticidad en el Sistema. Se asigna un valor según capacidad de bombeo (Q_b).

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 108 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de la Plantas elevadoras de agua potable (PEAP)

/SIPEAP1	Rango	Puntuación
	$0=r1 \leq 0,20$	1,00
	$0,20 < r2 \leq 0,40$	0,80
	$0,40 < r3 \leq 0,60$	0,60
	$0,60 < r4 \leq 0,80$	0,40
	$0,80 < r5 \leq 1,00$	0,20
	$r6=1,00$	0,00
	Peso	Ponderación (%)
	$W_{sfPEAP1}$	10,35

/SIPEAP2	Rango	Puntuación
	$r1=0,10$	0,00
	$0,10 < r2 \leq 0,20$	0,10
	$0,20 < r3 \leq 0,40$	0,30
	$0,40 < r4 \leq 0,60$	0,50
	$0,60 < r5 \leq 0,80$	0,70
	$0,80 < r6 < 1,00$	0,90
	$r7=0$	1,00
	Peso	Ponderación (%)
$W_{sfPEAP2}$	12,38	

Antigüedad-A (años)	Puntuación
$A > 100$	1,00
$75 < A \leq 100$	0,90
$50 < A \leq 75$	0,70
$25 < A \leq 50$	0,50
$15 < A \leq 25$	0,30
$5 < A \leq 15$	0,20
$A \leq 5$	0,10

Material-M	Puntuación
HA	1
HS	2

/SIPEAP3	Rango	Puntuación
	$0 = r1 \leq 0,20$	1,00
	$0,20 < r2 \leq 0,40$	0,80
	$0,40 < r3 \leq 0,60$	0,60
	$0,60 < r4 \leq 0,80$	0,40
	$0,80 < r5 < 1,00$	0,20
	$r6=1,00$	0,00
	Peso	Ponderación (%)
	$W_{sfPEAP3}$	12,38

/SIPEAP4	Rango	Puntuación
	$r1=0,5$	0,00
	$r2=1$	0,50
	$r3=2$	1,00
	Peso	Ponderación (%)
$W_{sfPEAP4}$	18,71	

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 109 se presentan los indicadores de susceptibilidad física de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 109 Indicadores de susceptibilidad física de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I_{sf_{PTAP1}}$	Antigüedad (años) y material o tipología constructiva de la instalación. (A/M).	La antigüedad de la instalación y la tipología constructiva relacionada con los materiales empleados y su diseño. Se asigna un valor según los rangos estimados.
$I_{sf_{PTAP2}}$	Infraestructura de entrada y decantación primaria.	Se refiere al número de canales de entrada (incluido desbaste) y la decantación primaria de la instalación, es decir alternativa de pretratamiento (%) con relación a la capacidad de tratamiento de la PTAP. En caso de incidencia física en estos componentes disponer de alternativas. Se mide en base al número de canales de entrada y decantadores primarios adicionales (capacidad adicional). Se asigna un valor según los rangos estimados.
$I_{sf_{PTAP3}}$	Grado de equipamiento telemando y comunicaciones.	Se refiere a la infraestructura de equipamiento de telemando y de comunicaciones de los procesos operativos de la instalación. Para su valoración se establecen rangos de medición, y la valoración de estos.
$I_{sf_{PTAP4}}$	Grado de equipamiento de cloración.	En relación con el sistema y la tipología de equipos de cloración o de desinfección de agua. Según el proceso de desinfección (hipoclorito, cloro gas, u ozono) se dispondrá de un tipo de infraestructura. Para su valoración se establecen rangos de medición, basados en la tipología del proceso, de equipos, calidades y prestaciones.
$I_{sf_{PTAP5}}$	Grado de equipamiento infraestructura de filtración.	Se refiere a la infraestructura física específica adicional, según la tipología de los equipos de filtración de agua. Para ello, se han establecido 3 tipologías de filtros (de arena, de carbón activo y ósmosis inversa). Se asignan valores según los rangos de medición estimados.
$I_{sf_{PTAP6}}$	Capacidad de tratamiento según rango de operación Turbidez (l/s): $Q_t \leq 100$, $100 < Q_t < 1000$, $Q_t \geq 1000$	La infraestructura se clasifica según la capacidad de tratamiento, según el grado de turbidez del agua bruta. Se asigna un valor según el rango establecido en base la capacidad de tratamiento.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 110 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de las Plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).

I _{SPEAP1}	Rango	Puntuación
	r1=0,05	0,00
	0,05< r2≤ 0,20	0,10
	0,20<r3≤ 0,40	0,30
	0,40< r4≤ 0,60	0,50
	0,60<r5≤ 0,80	0,70
	0,80<r6< 1,00	0,90
	r7=0	1,00
	Peso	Ponderación (%)
<i>W_{SfPTAP1}</i>	7,11	

Antigüedad-A (años)	Puntuación
A > 50	1,00
35<A≤ 50	0,90
25<A≤ 35	0,70
10<A≤ 25	0,40
A≤ 5	0,10

Material-M	Puntuación
HA	1
HS	2

I _{SfPTAP2}	Rango	Puntuación
	r1=0,10	1,00
	0,10< r2≤ 0,30	0,80
	0,30<r3≤ 0,50	0,60
	0,50< r4≤ 0,70	0,40
	0,70<r5≤ 0,90	0,20
	0,80<r6≤ 1,00	0,10
	r7=1,00	0,00
	Peso	Ponderación (%)
<i>W_{SfPTAP2}</i>	17,41	

I _{SfPTAP3}	Rango	Puntuación
	r1=0,20	1,00
	0,20< r2≤ 0,40	0,80
	0,40<r3≤ 0,60	0,60
	0,60< r4≤ 0,80	0,40
	0,80<r5<1,00	0,20
	r6=1,00	0,00
	Peso	Ponderación (%)
	<i>W_{SfPTAP3}</i>	15,64

$I_{sfPTAP4}$	Rango	Puntuación	$I_{sfPTAP5}$	Rango	Puntuación	$I_{sfPTAP6}$	Rango	Puntuación
	$r1=0,20$	1,00		$r1=0,20$	1,00		$r1=0,5$	0,00
	$0,20 < r2 \leq 0,40$	0,80		$0,20 < r2 \leq 0,40$	0,80		$r2=1$	0,50
	$0,40 < r3 \leq 0,60$	0,60		$0,40 < r3 \leq 0,60$	0,60		$r3=2$	1,00
	$0,60 < r4 \leq 0,80$	0,40		$0,60 < r4 \leq 0,80$	0,40		Peso	Ponderación (%)
	$0,70 < r5 \leq 0,90$	0,20		$0,70 < r5 \leq 0,90$	0,20		$W_{sfPTAP6}$	10,51
	$r6=1,00$	0,00		$r6=1,00$	0,00			
	Peso	Ponderación (%)		Peso	Ponderación (%)			
$W_{sfPTAP4}$	13,88	$W_{sfPTAP5}$	12,17					

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 111 se presentan los indicadores de susceptibilidad física de los pozos de captación (PC) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de los pozos de captación (PC) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 111 Indicadores de susceptibilidad física de los pozos de captación (PC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
I_{sfPC1}	Grado de implantación de cuadros eléctricos equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación-	Define el grado de implantación de equipamiento eléctrico de maniobra y gestión de los equipos electromecánicos de la instalación. Para su valoración se establecen rangos de medición, basados en la tipología de equipos, calidades y prestaciones.
I_{sfPC2}	La antigüedad (años) y naturaleza material de la estructura de la instalación (HS-HA). (A/M).	Se refiere a la antigüedad y la naturaleza material de la instalación (obra civil). Para su valoración se establecen rangos de medición.
I_{sfPC3}	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería.	Define el grado de implantación de equipamiento hidráulico avanzado, calderería y accesorios de la instalación. Para su valoración se establecen rangos de medición, basados en la tipología de equipos, calidades y prestaciones.
I_{sfPC4}	Clasificación por capacidad de bombeo (l/s): $Q_b \leq 100$, $100 < Q_b < 1000$, $Q_b \geq 1000$.	La instalación se clasifica por la capacidad de bombeo, estableciendo así su criticidad en el Sistema. Se miden en base a capacidad de bombeo y un valor asignado.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 112 Rangos y valores de Indicadores de susceptibilidad física de los pozos de captación (PC).

I _s PC1	Rango	Puntuación
	0=r1≤ 0,20	1,00
	0,20<r2≤ 0,40	0,80
	0,40< r3≤ 0,60	0,60
	0,60<r4≤ 0,80	0,40
	0,80<r5≤ 1,00	0,20
	r6=1,00	0,00
	Peso	Ponderación (%)
	<i>W_{sfPC1}</i>	12,19

I _s PC3	Rango	Puntuación
	r1=0.05	
	0,05< r2≤ 0,20	1,00
	0,20< r3≤ 0,40	0,80
	0,40<r4≤ 0,60	0,60
	0,60< r5≤ 0,80	0,40
	0,80<r6< 1,00	0,20
	r7=1,00	0,00
	Peso	Ponderación (%)
	<i>W_{sfPC2}</i>	14,53

Antigüedad-A (años)	Puntuación
A > 100	1,00
75<A≤ 100	0,90
50<A≤ 75	0,70
25<A≤ 50	0,50
15<A≤ 25	0,30
5<A≤ 15	0,20
A≤ 5	0,10

Material-M	Puntuación
HA	1
HS	2

I _s PC3	Rango	Puntuación
	0 = r1≤0,20	1,00
	0,20< r2≤ 0,40	0,80
	0,40<r3≤ 0,60	0,60
	0,60< r4≤ 0,80	0,40
	0,80<r5< 1,00	0,20
	r6=1,00	0,10
	Peso	Ponderación (%)
	<i>W_{sfPC3}</i>	12,38

I _s PC4	Rango	Puntuación
	r1=0,5	0,00
	r2=1	0,50
	r3=2	1,00
	Peso	Ponderación (%)
	<i>W_{sfPC4}</i>	18,71

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 113 se presentan los indicadores de susceptibilidad física de la red de distribución (RD) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de la red de distribución (RD) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 113 Indicadores de susceptibilidad física de la red de distribución (RD)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
I_{sfRD1}	Antigüedad (años)/Naturaleza del material. (A/M).	Se le asigna un valor para cada tipo de material y su antigüedad respectiva. Para su valoración se establecen rangos de medición, y valores estimados.
I_{sfRD2}	Nº de conexiones con unión flexible/Nº cámaras de inspección	Se refiere al número de conexiones con unión flexible (disipadores de energía) y el número de cámaras de inspección de la red de distribución, lo que permite verificar posibles incidencias y acciones de alternativas. Así mismo, definen un punto crítico de transición debido al cambio de rigidez estructural entre ambos elementos. Para su valoración se establecen rangos de medición.
I_{sfRD3}	Nº válvulas telemandadas/Nº total de válvulas de corte.	Establece la tasa de válvulas telemandadas, indicando el grado de automatización de la red de distribución. Para su valoración se establecen rangos de medición, y valores estimados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 114 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de la red de distribución (RD).

I_{sfRD1}	Rango	Puntuación	Antigüedad-A (años)	Puntuación	Material-M	Puntuación
	$r1=0,10$	0,00	$A > 75$	1,00	Acero	1
	$0,10 < r2 \leq 0,20$	0,10	$50 < A \leq 75$	0,90	PE	2
	$0,20 < r3 \leq 0,40$	0,30	$35 < A \leq 50$	0,70	HA	3
	$0,40 < r4 \leq 0,60$	0,50	$25 < A \leq 35$	0,50	PVC	4
	$0,60 < r5 \leq 0,80$	0,70	$15 < A \leq 25$	0,30	HS	5
	$0,80 < r6 \leq 1,00$	0,90	$10 < A \leq 15$	0,20	FFG	6
	$r7=1,00$	1,00	$A \leq 10$	0,10	AC	7
	Peso	Ponderación (%)				
W_{sfRD1}	12,19					

I _s f _{RD2}	Rango	Puntuación
	0 = r1 ≤ 0,20	1,00
	0,20 < r2 ≤ 0,40	0,80
	0,40 < r3 ≤ 0,60	0,60
	0,60 < r4 ≤ 0,80	0,40
	0,80 < r5 < 1,00	0,20
	r6 = 1,00	0,00
	Peso	Ponderación (%)
	W _s f _{RD2}	17,43

I _s f _{RD3}	Rango	Puntuación
	0 = r1 ≤ 0,20	1,00
	0,20 < r2 ≤ 0,40	0,80
	0,40 < r3 ≤ 0,60	0,60
	0,60 < r4 ≤ 0,80	0,40
	0,80 < r5 < 1,00	0,20
	r6 = 1,00	0,00
	Peso	Ponderación (%)
	W _s f _{RD3}	14,53

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 115 se presentan los indicadores de susceptibilidad física de la red de transporte (RT) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de la red de transporte (RT) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 115 Indicadores de susceptibilidad física de la red de transporte (RT)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
I _s f _{RT1}	Antigüedad (años)/Naturaleza del material. (A/M).	Se le asigna un valor para cada tipo de material y su antigüedad respectiva.
I _s f _{RT2}	Nº de derivaciones con unión flexible/Nº cámaras de inspección	Se refiere al número de conexiones con unión flexible (absorción de movimientos) existentes en la longitud del tramo de red de transporte, y por otra parte las cámaras de inspección permiten verificar posibles incidencias y acciones de alternativas. Así mismo, definen puntos críticos de transición debido al diferente grado de rigidez de ambos elementos (derivación y cámara de inspección).

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 116 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de la red de transporte (RT).

I _{SIRT1}	Rango	Puntuación
	r1=0,10	0,00
	0,10< r2≤ 0,20	0,10
	0,20<r3≤ 0,40	0,30
	0,40< r4≤ 0,60	0,50
	0,60<r5≤ 0,80	0,70
	0,80<r6≤ 1,00	0,90
	r7=1,00	1,00
	Peso	Ponderación (%)
W_{sfRT1}	30,67	

Antigüedad-A (años)	Puntuación	Material-M	Puntuación
A > 75	1,00	Acero	1
50<A≤ 75	0,90	PE	2
35<A≤ 50	0,70	HA	3
25<A≤ 35	0,50	PVC	4
15<A≤ 25	0,30	HS	5
10<A≤ 15	0,20	FFG	6
A≤ 10	0,10	AC	7

I _{SIRT2}	Rango	Puntuación
	0 = r1≤0,20	1,00
	0,20< r2≤ 0,40	0,80
	0,40<r3≤ 0,60	0,60
	0,60< r4≤ 0,80	0,40
	0,80<r5< 1,00	0,20
	r6=1,00	0,00
	Peso	Ponderación (%)
W_{sfRT2}	21,55	

Fuente: Elaboración Propia

A.7.1.2. Susceptibilidad física del sistema de saneamiento

En la Tabla 117 se presentan los indicadores de susceptibilidad física de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 117 Indicadores de susceptibilidad física de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I_{sf_{PEAS1}}$	Grado de implantación de cuadros eléctricos de equipos electromecánicos de maniobra y gestión de la instalación.	Define el grado de implantación de equipamiento eléctrico de maniobra y gestión de los equipos electromecánicos de la instalación. Se mide en base a la calidad de materiales, parámetros medidos y prestaciones operativas.
$I_{sf_{PEAS2}}$	La antigüedad (años) y tipología constructiva de la instalación (HS-HA). (A/M).	Se refiere a la antigüedad y la naturaleza material de la instalación (obra civil). Se mide en base a rangos y asignando un valor.
$I_{sf_{PEAS3}}$	Grado de Equipamiento hidráulico y calderería.	Define el grado de implantación de equipamiento hidráulico avanzado, calderería y accesorios de la instalación. Se mide en base a la tipología de equipos, calidad de materiales, parámetros medidos y prestaciones operativas.
$I_{sf_{PEAS4}}$	Clasificación por capacidad de bombeo (l/s): $Q_b \leq 100$, $100 < Q_b < 1000$, $Q_b \geq 1000$.	La instalación se clasifica por la capacidad de bombeo, estableciendo así su criticidad en el Sistema. Se mide en base a la calidad de materiales, parámetros medidos y prestaciones operativas.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 118 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS)

IS/PEAS1	Rango	Puntuación
	$0=r_1 \leq 0,20$	1,00
	$0,20 < r_2 \leq 0,40$	0,80
	$0,40 < r_3 \leq 0,60$	0,60
	$0,60 < r_4 \leq 0,80$	0,40
	$0,80 < r_5 \leq 1,00$	0,20
	$r_6=1,00$	0,00
	Peso	Ponderación (%)
$W_{sfPEAS1}$	22,05	

IS/PEAS2	Rango	Puntuación
	$r_1=0,10$	0,00
	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	0,10
	$0,20 < r_3 \leq 0,40$	0,30
	$0,40 < r_4 \leq 0,60$	0,50
	$0,60 < r_5 \leq 0,80$	0,70
	$0,80 < r_6 < 1,00$	0,90
	$r_7=0$	1,00
Peso	Ponderación (%)	
$W_{sfPEAS2}$	10,72	

Antigüedad-A (años)	Puntuación
$A > 100$	1,00
$75 < A \leq 100$	0,90
$50 < A \leq 75$	0,70
$25 < A \leq 50$	0,50
$15 < A \leq 25$	0,30
$5 < A \leq 15$	0,20
$A \leq 5$	0,10
Material-M	Puntuación
HA	1
HS	2

IS/PEAS3	Rango	Puntuación
	$0 = r_1 \leq 0,20$	1,00
	$0,20 < r_2 \leq 0,40$	0,80
	$0,40 < r_3 \leq 0,60$	0,60
	$0,60 < r_4 \leq 0,80$	0,40
	$0,80 < r_5 < 1,00$	0,20
	$r_6=1,00$	0,00
	Peso	Ponderación (%)
$W_{sfPEAS3}$	16,02	

IS/PEAS4	Rango	Puntuación
	$r_1=0,5$	0,00
	$r_2=1$	0,50
	$r_3=2$	1,00
	Peso	Ponderación (%)
$W_{sfPEAS4}$	10,00	

Fuente: Elaboración Propia

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan los indicadores de susceptibilidad física de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 119 Indicadores de susceptibilidad física de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
<i>Isf_{PTAS1}</i>	Antigüedad (años) y naturaleza material o tipología constructiva de la instalación. (A/M)	La antigüedad de la instalación y la tipología constructiva relacionada con los materiales empleados y su diseño. Se mide en base a rangos y valores asignados.
<i>Isf_{PTAS2}</i>	Grado de equipamiento telemando y comunicaciones.	Se refiere al equipamiento de telemando y de comunicaciones de los procesos operativos de la instalación. Su definición incorpora la calidad de materiales y prestaciones. Se mide en base a rangos y valores asignados.
<i>Isf_{PTAS3}</i>	Grado de equipamiento electromecánico de la instalación. (Durabilidad de equipamiento, calidad de materiales...).	Se refiere al equipamiento electromecánico de la instalación. En referencia a la durabilidad de los materiales y garantía de funcionamiento "robustez". Se mide en base a rangos y valores asignados.
<i>Isf_{PTAS4}</i>	Grado de equipamiento cloración y equipamiento de desinfección.	Se refiere al sistema y la tipología de equipos de cloración de agua. Se mide en base a rangos y valores asignados.
<i>Isf_{PTAS5}</i>	Clasificación por capacidad de tratamiento Qt (l/s) (Pequeña, Mediana, Grande).	Se clasifica la planta en base al caudal máximo de tratamiento, estableciendo los siguientes rangos de tratamiento: Pequeña $Qt \leq 1000$, Mediana $1000 < Qt < 5000$, y Grande $Qt \geq 5000$. Se mide asignando valores a cada tipología de PTAS.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 120 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)

ISIPTAS1	Rango	Puntuación
	$r1=0,05$	0,00
	$0,05 < r2 \leq 0,20$	0,10
	$0,20 < r3 \leq 0,40$	0,30
	$0,40 < r4 \leq 0,60$	0,50
	$0,60 < r5 \leq 0,80$	0,70
	$0,80 < r6 < 1,00$	0,90
	$r7=0$	1,00
Peso	Ponderación (%)	
$W_{sfPTAS1}$	23,23	

Antigüedad-A (años)	Puntuación	Material-M	Puntuación
$A > 50$	1,00	HA	1
$35 < A \leq 50$	0,90	HS	2
$25 < A \leq 35$	0,70		
$10 < A \leq 25$	0,40		
$A \leq 10$	0,10		

ISIPTAS2	Rango	Puntuación
	$0 = r1 \leq 0,20$	1,00
	$0,20 < r2 \leq 0,30$	0,80
	$0,30 < r3 \leq 0,50$	0,60
	$0,50 < r4 \leq 0,70$	0,40
	$0,70 < r5 < 0,90$	0,20
	$0,90 < r6 < 1,00$	0,10
	$r7=1$	0,00
Peso	Ponderación (%)	
$W_{sfPTAS2}$	7,14	

ISIPTAS3	Rango	Puntuación
	$0 = r1 \leq 0,20$	1,00
	$0,20 < r2 \leq 0,40$	0,80
	$0,40 < r3 \leq 0,60$	0,60
	$0,60 < r4 \leq 0,80$	0,40
	$0,80 < r5 < 1,00$	0,20
	$r6=1,00$	0,00
	Peso	Ponderación (%)
$W_{sfPTAS3}$	7,55	

ISIPTAS4	Rango	Puntuación
	$0 = r1 \leq 0,20$	1,00
	$0,20 < r2 \leq 0,40$	0,80
	$0,40 < r3 \leq 0,60$	0,60
	$0,60 < r4 \leq 0,80$	0,40
	$0,80 < r5 < 1,00$	0,20
	$r6=1,00$	0,00
	Peso	Ponderación (%)
$W_{sfPTAS4}$	8,19	

ISIPTAS5	Rango	Puntuación
	$r1=0,5$	0,00
	$r2=1$	0,50
	$r3=2$	1,00
	Peso	Ponderación (%)
$W_{sfPTAS5}$	9,20	

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 121 se presentan los indicadores de susceptibilidad física de la red de alcantarillado (RAS) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad física intrínseca de la red de alcantarillado (RAS) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 121 Indicadores de susceptibilidad física de la red de alcantarillado (RAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I_{sf_{RAS1}}$	Nº cámaras o pozos de registro/Longitud total red alcantarillado (km). (Respecto del total respectivo del Sistema).	La relación entre la longitud de red de alcantarillado y el número de cámaras permite planificar desvíos alternativos y la variación del grado de rigidez de aquella (la infraestructura de red de alcantarillado en su conjunto). Su medición se realiza estableciendo rangos y asignando valores.
$I_{sf_{RAS2}}$	Longitud red alcantarillado por gravedad (%)/Longitud red alcantarillado-impulsada (%)	Tasa de red de gravedad respecto a la red impulsada. Permite planificar la gestión de la red según tipología. Su medición se realiza estableciendo rangos y asignando valores.
$I_{sf_{RAS3}}$	Antigüedad de la red de alcantarillado (años) y naturaleza material. (A/M).	Se le asigna un valor para cada tipo de material y su antigüedad respectiva.
$I_{sf_{RAS4}}$	Longitud (km) red alcantarillado no visitable inspeccionada deteriorada/Longitud total red de alcantarillado no visitable inspeccionada (km).	Tasa de red de alcantarillado no visitable, inspeccionada con grado de deterioro del material. Este indicador refleja el estado de deterioro estructural de la red de alcantarillado. Su medición se realiza estableciendo rangos y asignando valores.
$I_{sf_{RAS5}}$	Caudal de infiltración en tubería y/o unión red de alcantarillado (m ³ /día/cm diámetro) / Longitud red de alcantarillado (km).	Tasa anual de Infiltraciones en la red de alcantarillado. Desde el punto de vista físico, permite conocer el grado de deterioro de la red. Indicador esencial para la planificación del mantenimiento y la gestión de activos. Su medición se realiza estableciendo rangos y asignando valores.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 122 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad física de la red de alcantarillado (RAS)

/sFRAS1	Rango	Puntuación
	$0,00=r1\leq 0,20$	0,00
	$0,20<r2\leq 0,40$	0,30
	$0,40< r3\leq 0,60$	0,50
	$0,60<r4\leq 0,80$	0,60
	$0,80<r5< 1,00$	0,90
	$r6=1,00$	1,00
	Peso	Ponderación (%)
	W_{sfRAS1}	3,92

/sFRAS2	Rango	Puntuación
	$0 = r1\leq 0,20$	1,00
	$0,20< r2\leq 0,50$	0,80
	$0,50<r3\leq 1,00$	0,60
	$1,00< r4\leq 5,00$	0,40
	$5,00<r5< 9,00$	0,20
	$9,00\leq r6< 100,00$	0,00
	Peso	Ponderación (%)
	W_{sfRAS2}	10,38

/sFRAS3	Rango	Puntuación
	$r1=0,10$	0,00
	$0,10< r2\leq 0,20$	0,10
	$0,20<r3\leq 0,40$	0,30
	$0,40< r4\leq 0,60$	0,50
	$0,60<r5\leq 0,80$	0,70
	$0,80<r6\leq 1,00$	0,90
	$r7=1,00$	1,00
	Peso	Ponderación (%)
	W_{sfRAS3}	41,24

Antigüedad-A (años)	Puntuación	Material-M	Puntuación
$A > 100$	1,00	Acero	1
$75<A\leq 100$	0,90	FD	2
$50<A\leq 75$	0,70	PE	3
$25<A\leq 50$	0,50	HA	4
$15<A\leq 25$	0,30	PVC	5
$5<A\leq 15$	0,20	HS	6
$A\leq 5$	0,10	FFG	7
		AC	8

I _{SIRAS4}	Rango	Puntuación
	0 = r1 ≤ 0,20	1,00
	0,20 < r2 ≤ 0,50	0,80
	0,50 < r3 ≤ 1,00	0,60
	1,00 < r4 ≤ 5,00	0,40
	5,00 < r5 < 9,00	0,20
	9,00 ≤ r6 < 100,00	0,00
	Peso	Ponderación (%)
	W _{SfRAS4}	7,25

I _{SIRAS5}	Rango	Puntuación
	0 = r1 ≤ 0,05	1,00
	0,05 < r2 ≤ 0,25	0,80
	0,25 < r3 ≤ 0,50	0,60
	0,50 < r4 ≤ 0,75	0,40
	0,75 < r5 ≤ 0,90	0,20
	r6 > 0,90	0,00
	Peso	Ponderación (%)
	W _{SfRAS5}	7,25

Fuente: Elaboración Propia

A.7.2. Indicadores de Susceptibilidad operacional

A.7.2.1. Susceptibilidad operacional del sistema de Abastecimiento

En la Tabla 123 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de los acueductos (AC), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de los acueductos (AC) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 123 Indicadores de susceptibilidad operacional de los acueductos (AC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
ISO_{AC1}	Nº reparaciones tramo acueducto (año)/Longitud acueducto (km)	Tasa anual de reparaciones por tramo de acueducto, con corte parcial o total del tramo afectado Su medición se realiza estableciendo rangos y asignando valores.
ISO_{AC2}	Km de acueducto inspeccionado al año /Km total de acueducto	Mide el porcentaje de acueducto inspeccionado al año, con el objetivo de evaluar su estado y funcionamiento. Su medición se realiza estableciendo rangos y asignando valores.
ISO_{AC3}	Grado de desarrollo de alternativas suministro de agua	Representa el porcentaje de caudal suministrado por las alternativas de suministro desarrolladas, en referencia al caudal normal de suministro establecido. Su medición se realiza estableciendo rangos y asignando valores.
ISO_{AC4}	Grado de Mantenimiento [C-P]	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en correctivo y preventivo. Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado. Mantenimiento correctivo-C (susceptibilidad máxima 1), y mantenimiento preventivo-P (susceptibilidad mínima 0).

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 124 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de los acueductos (AC).

Nº reparaciones tramo (R)	R1=0	0 < R2 ≤ 5	5 < R3 ≤ 10	10 < R4 ≤ 15	15 < R5 ≤ 20	20 < R6 ≤ 25	25 < R7 ≤ 35	R8 > 35	
	0	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85	1	
Longitud acueducto (km)	0 < l1 ≤ 1	1 < l2 ≤ 3	3 < l3 ≤ 5	5 < l4 ≤ 10	10 < l5 ≤ 25	25 < l6 ≤ 50	l7 > 50		
	1	0,80	0,65	0,50	0,35	0,20	0,05		
	r1=0	0 < r2 ≤ 2	2 < r3 ≤ 3	3 < r4 ≤ 5	5 < r5 ≤ 10	10 < r6 ≤ 15	15 < r7 ≤ 20	r8=20	$W_{SO_{AC1}}$
ISO_{AC1}	0	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85	1	15,60%
	r1=0	0 < r2 ≤ 5	5 < r3 ≤ 10	10 < r4 ≤ 15	15 < r5 ≤ 20	20 < r6 ≤ 25	25 < r7 ≤ 35	r8 > 35	$W_{SO_{AC2}}$
ISO_{AC2}	1	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,10	0	8,32%

	$0 = r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,25$	$0,25 < r3 \leq 0,40$	$0,40 < r4 \leq 0,55$	$0,55 < r6 \leq 0,70$	$0,70 < r6 < 0,85$	$0,85 \leq r7 < 1$	$r8=1$	$W_{so_{AC3}}$
Iso_{AC3}	1	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,10	0	7,38%

	$0 = r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,25$	$0,25 < r3 \leq 0,40$	$0,40 < r4 \leq 0,55$	$0,55 < r6 \leq 0,70$	$0,70 < r6 < 0,85$	$0,85 \leq r7 < 1$	$r8=1$	$W_{so_{AC4}}$
Iso_{AC4}	1	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,10	0	12,40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 125 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de las captaciones superficiales (CS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de las captaciones superficiales (CS) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 125 Indicadores de susceptibilidad operacional de las captaciones superficiales (CS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
Iso_{CS1}	Grado de Mantenimiento (C-P)	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en correctivo (C) y preventivo (P). C=1, y P=0. Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado.
Iso_{CS2}	Nº y tipología de averías de la instalación (anual)	Se refiere a la tasa anual de averías y su tipología. Se clasifican las averías según se generen en equipos de bombeo, equipos electromecánicos, programación y telemando, cuadros eléctricos, instalación eléctrica, y obra civil e instalaciones auxiliares. Se mide en base a rangos y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 126 Rangos y valores de susceptibilidad operacional de las captaciones superficiales (CS).

	$r1=0$	$0 < r2 \leq 5$	$5 < r3 \leq 10$	$10 < r4 \leq 15$	$15 < r5 \leq 20$	$20 < r6 < 25$	$r7 > 25$	$W_{so_{CS1}}$
Iso_{CS1}	1	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,10	19,27%

	$r1=0$	$0 < r2 \leq 0,20$	$5 < r3 \leq 0,40$	$0,40 < r4 \leq 0,60$	$0,60 < r5 \leq 0,80$	$0,80 < r6 < 1$	$r7 = 1$	$W_{so_{CS1}}$
Iso_{CS2}	1	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,10	16,24%

En la Tabla 127 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de los embalses (EMB), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de los embalses (EMB) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 127 Indicadores de susceptibilidad operacional de los embalses (EMB)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
ISO_{EMB1}	Volumen de agua fugada (m3/año) /Capacidad operativa embalse (Hm3)	Tasa anual de volumen de agua fugada (m3) en relación con la capacidad operativa del embalse (Hm3). Su medición se realiza estableciendo rangos y asignando valores.
ISO_{EMB2}	Grado de Mantenimiento [C-P]	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en correctivo (C) y preventivo (P). C=1, y P=0. Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 128 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de los embalses (EMB).

	$0 = r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,25$	$0,25 < r3 \leq 0,40$	$0,40 < r4 \leq 0,55$	$0,55 < r6 \leq 0,70$	$0,70 < r6 < 0,85$	$0,85 \leq r7 < 1$	$r8=1$	$W_{SO_{EMB1}}$
ISO_{EMB1}	1	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,10	0	27,18%

	$0 = r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,25$	$0,25 < r3 \leq 0,40$	$0,40 < r4 \leq 0,55$	$0,55 < r6 \leq 0,70$	$0,70 < r6 < 0,85$	$0,85 \leq r7 < 1$	$r8=1$	$W_{SO_{EMB2}}$
ISO_{EMB2}	0	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85	1	23,65%

En la Tabla 129 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de los estanques (EST), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de los estanques (EST) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 129 Indicadores de susceptibilidad operacional de los estanques (EST)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
ISO_{EST1}	Autonomía (horas)/Caudal suministrado (m3/s)	Relaciona la autonomía de funcionamiento y el caudal suministrado por el estanque. Se mide en base a rangos y valores asignados.
ISO_{EST2}	Grado de Mantenimiento (C-P)	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en correctivo (C) y preventivo (P). C=1, y P=0. Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 130 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de los estanques (EST).

	$0 < r1 \leq 1$	$1 < r2 \leq 2$	$2 < r3 \leq 3$	$3 < r4 \leq 4$	$4 < r5 \leq 5$	$5 < r6 \leq 6$	$6 < r7 \leq 7$	$7 < r8 \leq 8$	$8 < r9 \leq 9$	$r10 > 9$	$W_{SO_{EST1}}$
ISO_{EST1}	1	0,90	0,80	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0	6,58%

	$0 < r1 \leq 0,1$	$0,1 < r2 \leq 0,2$	$0,2 < r3 \leq 0,3$	$0,3 < r4 \leq 0,4$	$0,4 < r5 \leq 0,5$	$0,5 < r6 \leq 0,6$	$0,6 < r7 \leq 0,7$	$0,7 < r8 \leq 0,8$	$0,8 < r9 \leq 0,9$	$r10 > 0,9$	$W_{SO_{EST2}}$
ISO_{EST2}	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1	12,12%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 131 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 131 Indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
ISO_{PEAP1}	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Caudal de agua elevada (m3/h)	Potencia eléctrica utilizada respecto a la total instalada durante la operación de la instalación (100%) para elevar un caudal de (m3/h). Se mide en base a rangos y valores asignados.
ISO_{PEAP2}	Grado de Mantenimiento (C-P)	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en correctivo (C) y preventivo (P). C=1, y P=0. Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado.
ISO_{PEAP3}	Nº y tipología de averías de la instalación (anual) con parada de la instalación.	Se refiere a la tasa anual de averías y su tipología. Se clasifican las averías según se generen en equipos de bombeo, equipos electromecánicos, programación y telemando, Cuadros eléctricos, instalación eléctrica, y obra civil e instalaciones auxiliares. Se mide en base a rangos y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 132 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP).

	$r1 \leq 0,001$	$0,001 < r2 \leq 0,005$	$0,005 < r3 \leq 0,010$	$0,010 < r4 \leq 0,015$	$0,015 < r5 \leq 0,020$	$0,020 < r6 \leq 0,025$	$r7 > 0,025$	$W_{SOPEAP1}$	
ISO_{PEAP1}	0	0,10	0,30	0,50	0,70	0,90	1,0	17,01%	

	$r1 \leq 0,1$	$0,10 < r2 \leq 0,2$	$0,20 < r3 \leq 0,3$	$0,30 < r4 \leq 0,4$	$0,40 < r5 \leq 0,5$	$25 < r6 \leq 0,6$	$0,60 < r7 \leq 0,7$	$0,70 < r8 \leq 0,8$	$0,80 < r9 \leq 0,9$	$r10 > 0,9$	$W_{SOPEAP2}$
ISO_{PEAP2}	1	0,90	0,80	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0	15,36%

	$0 < r1 \leq 5$	$5 < r2 \leq 10$	$10 < r3 \leq 15$	$15 < r4 \leq 20$	$20 < r5 \leq 25$	$25 < r6 \leq 30$	$30 < r7 \leq 35$	$35 < r8 \leq 40$	$40 < r9 \leq 45$	$r10 > 45$	$W_{SOPEAP3}$
ISO_{PEAP3}	0,10	0,20	0,30	0,40	0,40	0,50	0,30	0,20	0,10	0	13,80%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 133 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 133 Indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
ISO_{PTAP1}	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Caudal de agua producida (m ³ /h)	Potencia eléctrica utilizada respecto a la total instalada durante la operación de la instalación (100%). Se mide en base a rangos y valores asignados.
ISO_{PTAP2}	Grado de Mantenimiento (C-P)	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en correctivo (C) y preventivo (P). C=1, y P=0. Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado.
ISO_{PTAP3}	Nº y tipología de fallas anuales con parada de proceso	Se refiere a la diferente tipología de fallas anuales producidas en los procesos de tratamiento (decantación, filtración, desinfección, y cloración). Se mide en base a rangos y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 134 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).

	$r1 \leq 0,001$	$0,001 < r2 \leq 0,005$	$0,005 < r3 \leq 0,010$	$0,010 < r4 \leq 0,015$	$0,015 < r5 \leq 0,020$	$0,020 < r6 \leq 0,025$	$r7 > 0,025$	$W_{SOPTAP1}$		
ISO_{PTAP1}	0	0,10	0,30	0,50	0,70	0,90	1,0	7,69%		

	$r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$r10 > 0,90$	$W_{SOPTAP2}$
ISO_{PTAP2}	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0	12,82%

	$0 < r1 \leq 1$	$1 < r2 \leq 2$	$2 < r3 \leq 4$	$4 < r4 \leq 6$	$6 < r5 \leq 8$	$8 < r6 \leq 10$	$10 < r7 \leq 12$	$12 < r8 \leq 14$	$14 < r9 \leq 16$	$r10 > 16$	$W_{SOPTAP3}$
ISO_{PTAP3}	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0	12,82%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 135 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de los pozos de captación (PC), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de los pozos de captación (PC) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 135 Indicadores de susceptibilidad operacional de los pozos de captación (PC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
ISO_{PC1}	Grado de Mantenimiento (C-P)	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en correctivo (C) y preventivo (P). C=1, y P=0. Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado.
ISO_{PC2}	Nº y tipología de averías de la instalación (anual) con parada de la instalación.	Se refiere a la tasa anual de averías y su tipología. Se clasifican las averías según se generen en equipos de bombeo, equipos electromecánicos, programación y telemando, Cuadros eléctricos, instalación eléctrica, y obra civil e instalaciones auxiliares. Se mide en base a rangos y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 136 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de los pozos de captación (PC).

	$r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$r10 > 0,90$	$W_{SO_{PC1}}$
ISO_{PC1}	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0	20,86%

	$0 < r1 \leq 5$	$5 < r2 \leq 10$	$10 < r3 \leq 15$	$15 < r4 \leq 20$	$20 < r5 \leq 25$	$25 < r6 \leq 30$	$30 < r7 \leq 35$	$35 < r8 \leq 40$	$40 < r9 \leq 45$	$r10 > 45$	$W_{SO_{PC2}}$
ISO_{PC2}	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1	19,10%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 137 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de la red de distribución (RD), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de la red de distribución (RD) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 137 Indicadores de susceptibilidad operacional de la red de distribución (RD)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
ISO_{RD1}	Nº de roturas no provocadas(año)/Longitud de red de distribución (km)	Indica la tasa anual de fallas no provocadas en la red de distribución. Su análisis de la evolución temporal permitirá plantear estrategias de planificación de mantenimiento e inversiones. Se mide en base a rangos y valores asignados
ISO_{RD2}	Grado de Mantenimiento (I-VI)	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en 6 niveles, siendo I (muy deficiente), y VI (óptimo). Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado.
ISO_{RD3}	Nº de válvulas de corte/Nº arranques domiciliarios.	Representa el número de válvulas de seccionamiento o de corte, en relación con el número de arranques. Se mide en base a rangos y valores asignados domiciliarios, asignándole un valor en orden a la criticidad.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 138 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de la red de distribución (RD).

	$0 < r1 \leq 0,5$	$0,5 < r2 \leq 0,4$	$0,4 < r3 \leq 0,3$	$0,3 < r4 \leq 0,2$	$0,2 < r5 \leq 0,1$	$0,1 < r6 \leq 0,05$	$0,05 < r7 \leq 0,025$	$0,025 < r8 \leq 0,010$	$0,010 < r9 \leq 0,005$	$r10 > 0,005$	$W_{SO_{RD1}}$
ISO_{RD1}	1	0,90	0,80	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0	19,10%

	Grado I	Grado II	Grado III	Grado IV	Grado V	Grado VI	$W_{SO_{RD2}}$
ISO_{RD2}	1	0,85	0,60	0,40	0,25	0,10	19,10%

	$0 < r1 \leq 0,02$	$0,02 < r2 \leq 0,03$	$0,03 < r3 \leq 0,04$	$0,04 < r4 \leq 0,05$	$0,05 < r5 \leq 0,06$	$0,06 < r6 \leq 0,07$	$0,07 < r7 \leq 0,08$	$0,08 < r8 \leq 0,09$	$0,09 < r9 \leq 0,10$	$r10 > 0,10$	$W_{SO_{RD3}}$
ISO_{RD3}	1	0,90	0,80	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0	15,88%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 139 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de la red de transporte (RT), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de la red de transporte (RT) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 139 Indicadores de susceptibilidad operacional de la red de transporte (RT)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
ISO_{RT1}	Nº reparaciones /Longitud total de red de transporte (km)	Tasa anual de reparaciones por km de red de transporte, con corte parcial o total del tramo afectado. Se mide en base a rangos y valores asignados.
ISO_{RT2}	Grado de Mantenimiento [C-P]	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en correctivo (C) y preventivo (P). C=1, y P=0. Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 140 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de la red de transporte (RT).

	$0 < r1 \leq 0,25$	$0,25 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,15$	$0,15 < r4 \leq 0,10$	$0,10 < r5 \leq 0,05$	$0,05 < r6 \leq 0,025$	$0,025 < r7 \leq 0,020$	$0,020 < r8 \leq 0,015$	$0,015 < r9 \leq 0,010$	$r10 > 0,01$	$W_{SO_{RT1}}$
ISO_{RT1}	1	0,90	0,80	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0	20,86%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$r10 > 0,90$	$W_{SO_{RT2}}$
ISO_{RT2}	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	0,90	1,0	24,86%

Fuente: Elaboración Propia

A.7.2.2. Susceptibilidad operacional del Sistema de Saneamiento

En la Tabla 141 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 141 Indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
ISO_{PEAS1}	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Agua tratada (m3/s)	Potencia eléctrica utilizada respecto a la total instalada durante la operación de la instalación (100%). Se mide en base a rangos y valores asignados.
ISO_{PEAS2}	Grado de Mantenimiento (C-P)	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en correctivo y preventivo. Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado.
ISO_{PEAS3}	Nº y tipología de averías de la instalación (anual)	Se refiere a la tasa anual de averías y su tipología. Se clasifican las averías según se generen en equipos de bombeo, equipos electromecánicos, programación y telemando, cuadros eléctricos, instalación eléctrica, y obra civil e instalaciones auxiliares. Se mide en base a rangos y valores asignados

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 142 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS).

	$r1 \leq 0,001$	$0,001 < r2 \leq 0,005$	$0,005 < r3 \leq 0,010$	$0,010 < r4 \leq 0,015$	$0,015 < r5 \leq 0,020$	$0,020 < r6 \leq 0,025$	$r7 > 0,025$	$W_{SO_{PEAS1}}$	
ISO_{PEAS1}	0	0,10	0,30	0,50	0,70	0,90	1,0	22,92%	

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq ,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$r10 > 0,90$	$W_{SO_{PEAS2}}$
ISO_{PEAS2}	1	0,90	0,80	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0	13,41%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq ,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$r10 > 0,90$	$W_{SO_{PEAS3}}$
ISO_{PEAS3}	1	0,90	0,80	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0	11,79%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 143 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 143 Indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
ISO_{PTAS1}	Potencia eléctrica utilizada (KW) /Agua depurada (m3/s)	Potencia eléctrica utilizada respecto a la total instalada durante la operación de la instalación (100%). Se mide en base a rangos y valores asignados.
ISO_{PTAS2}	Grado de Mantenimiento (C-P)	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en correctivo (C) y preventivo (P). Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado.
ISO_{PTAS3}	Nº y tipología de fallas anuales	Se refiere a la diferente tipología de fallas anuales producidas en los procesos de tratamiento (decantación, filtración, desinfección, y cloración)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 144 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq ,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$r10 > 0,90$	$W_{SO_{PTAS1}}$
ISO_{PTAS1}	1	0,90	0,80	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0	
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq ,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$r10 > 0,90$	$W_{SO_{PTAS2}}$
ISO_{PTAS2}	1	0,90	0,80	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0	
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq ,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$r10 > 0,90$	$W_{SO_{PTAS3}}$
ISO_{PTAS3}	1	0,90	0,80	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0	

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 145 se presentan los indicadores de susceptibilidad operacional de la red de alcantarillado (RAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían la susceptibilidad operacional intrínseca de la red de alcantarillado (RAS) independientemente de la amenaza considerada.

Tabla 145 Indicadores de susceptibilidad operacional de la red de alcantarillado (RAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
<i>ISO_{RAS1}</i>	Nº de roturas no provocadas (año)/Longitud de red de alcantarillado (km)	Indica la tasa anual de fallas no provocadas en la red de distribución. Su análisis de la evolución temporal permitirá plantear estrategias de planificación de mantenimiento e inversiones. Se mide en base a rangos y valores asignados.
<i>ISO_{RAS2}</i>	Grado de Mantenimiento [I-V]	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en 5 niveles -de menor a mayor- (I, II, III, IV, V). Se mide en base a rangos y valores asignados, según tipo de mantenimiento realizado.
<i>ISO_{RAS3}</i>	Longitud red de alcantarillado renovada, material, km/año, / Longitud total red (km).	Tasa de renovación anual de la red de alcantarillado. Permite planificar inversiones. Se mide en base a rangos y valores asignados.
<i>ISO_{RAS4}</i>	Longitud red de alcantarillado inspeccionada, material (km/año) /Longitud total red (km).	Tasa anual de red de alcantarillado inspeccionada según naturaleza del material. Permite detectar anomalías y realizar un seguimiento de su evolución. Se mide en base a rangos y valores asignados.
<i>ISO_{RAS5}</i>	Tn. lodos extraídos de la red de alcantarillado al año/Longitud de red alcantarillado (km).	Este indicador es relevante para establecer planificación de limpiezas y puntos críticos de la red de alcantarillado. Se mide en base a rangos y valores asignados.
<i>ISO_{RAS6}</i>	Nº de cámaras o pozos de alcantarillado limpiados/Nº total de cámaras o pozos de alcantarillado	Es el indicador de limpieza anual de cámaras o pozos de registro alcantarillado. Permite la planificación de actuaciones, y prever desbordamientos. Se mide en base a rangos y valores asignados.
<i>ISO_{RAS7}</i>	Nº clientes afectados por obstrucciones-año/ Nº total de clientes.	Es un indicador de calidad del servicio de alcantarillado. Se mide en base a rangos y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 146 Rangos y valores de indicadores de susceptibilidad operacional de la red de alcantarillado (RAS).

	$r1 \leq 0,03$	$0,03 < r2 \leq 0,10$	$0,10 < r3 \leq 0,17$	$0,17 < r4 \leq 0,26$	$0,26 < r5 \leq 0,37$	$0,37 < r6 \leq 0,50$	$0,50 < r7 \leq 0,60$	$0,60 < r8 \leq 0,70$	$0,70 < r9 \leq 0,80$	$r10 > 0,80$	$W_{SO_{RAS1}}$
ISO_{RAS1}	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1	20,02%

	Grado I	Grado II	Grado III	Grado IV	Grado V	$W_{SO_{RAS2}}$
ISO_{RAS2}	1	0,75	0,50	0,25	0,05	7,25%

	$0 < r1 \leq 0,01$	$0,01 < r2 \leq 0,02$	$0,02 < r3 \leq 0,03$	$0,03 < r4 \leq 0,04$	$0,04 < r5 \leq 0,05$	$0,05 < r6 \leq 0,06$	$0,06 < r7 \leq 0,07$	$0,07 < r8 \leq 0,08$	$0,08 < r9 \leq 0,09$	$0,09 < r10 \leq 0,1$	$r11 > 0,1$	$W_{SO_{RAS3}}$
ISO_{RAS3}	1	0,95	0,85	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15	0,10	19,93%

	$0 < r1 \leq 0,025$	$0,025 < r2 \leq 0,05$	$0,05 < r3 \leq 0,075$	$0,075 < r4 \leq 0,10$	$0,10 < r5 \leq 0,15$	$0,15 < r6 \leq 0,20$	$0,20 < r7 \leq 0,25$	$0,25 < r8 \leq 0,30$	$0,30 < r9 \leq 0,35$	$0,35 < r10 \leq 0,4$	$r11 > 0,4$	$W_{SO_{RAS4}}$
ISO_{RAS4}	1,0	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,20	0,15	0,10	11,36%

	$0 < r1 \leq 0,025$	$0,025 < r2 \leq 0,05$	$0,05 < r3 \leq 0,075$	$0,075 < r4 \leq 0,10$	$0,10 < r5 \leq 0,15$	$0,15 < r6 \leq 0,20$	$0,20 < r7 \leq 0,25$	$0,25 < r8 \leq 0,30$	$0,30 < r9 \leq 0,35$	$0,35 < r10 \leq 0,4$	$r11 > 0,4$	$W_{SO_{RAS5}}$
ISO_{RAS5}	1,0	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,20	0,15	0,10	7,25%

	$0 < r1 \leq 0,025$	$0,025 < r2 \leq 0,05$	$0,05 < r3 \leq 0,075$	$0,075 < r4 \leq 0,10$	$0,10 < r5 \leq 0,15$	$0,15 < r6 \leq 0,20$	$0,20 < r7 \leq 0,25$	$0,25 < r8 \leq 0,30$	$0,30 < r9 \leq 0,35$	$0,35 < r10 \leq 0,4$	$r11 > 0,4$	$W_{SO_{RAS6}}$
ISO_{RAS6}	1,0	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,20	0,15	0,10	7,25%

	$r1 \leq 0,01$	$0,01 < r2 \leq 0,025$	$0,025 < r3 \leq 0,10$	$0,10 < r4 \leq 0,20$	$0,20 < r5 \leq 0,30$	$0,30 < r6 \leq 0,40$	$0,40 < r7 \leq 0,50$	$r8 > 0,50$	$W_{SO_{RAS7}}$
ISO_{RAS7}	0,10	0,20	0,35	0,50	0,65	0,80	0,90	1	6,66%

Fuente: Elaboración Propia

Anexo 8: Indicadores de Resiliencia

A.8.1. Resiliencia hidrológica

En la ecuación (22) se presenta la resiliencia hidrológica de la infraestructura i (α_{Hi}), calculada como la suma ponderada ($W\alpha_{Hil}$) de los indicadores de resiliencia hidrológica de la infraestructura i ($I\alpha_{Hil}$). Estos medirían la capacidad de respuesta la infraestructura i frente a una amenaza hidrológica.

$$\alpha_{Hi} [Uc_H \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{Hi}} W\alpha_{Hil} \cdot I\alpha_{Hil} [Uc_H \cdot Daño^{-1}] \quad (22)$$

A.8.1.1. Resiliencia hidrológica del Sistema de Abastecimiento

En la Tabla 147 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas de los acueductos (AC) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los acueductos (AC) por unidad del parámetro crítico (Uc_H), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 147 Indicadores de resiliencia hidrológica de los acueductos (AC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HAC1}$	Tiempo medio de reposición del servicio (horas)	Se refiere a la evolución de la duración de las interrupciones del servicio, analizando las causas y optimizando las acciones. Se mide en base a los rangos del indicador y de la amenaza, estableciendo valores.
$I\alpha_{HAC2}$	Dispositivos de alerta de inundación (DA) en elementos críticos definidos de la instalación.	Nivel de desarrollo e implantación de dispositivos de alerta DA de inundación para la mitigación de daños físicos y operacionales. Se mide en base a los rangos del indicador y de la amenaza, estableciendo valores.
$I\alpha_{HAC3}$	Dispositivos de protección antihumedad en puntos críticos de la instalación definidos.	Su medición se efectúa en base al n° de dispositivos de protección IP68 en los puntos críticos de la instalación referenciados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y de la amenaza, estableciendo valores.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 148 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de los acueductos (AC).

	$0 < r1 \leq 2$	$2 < r2 \leq 4$	$4 < r3 \leq 6$	$6 < r4 \leq 8$	$8 < r5 \leq 12$	$12 < r6 \leq 16$	$16 < r7 \leq 24$	$24 < r8 \leq 36$	$r9 > 36$	$W\alpha_{HAC1}$	
$I\alpha_{HAC1}$	0,10	0,20	0,30	0,45	0,60	0,70	0,80	0,90	1	40%	
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HAC2}$
$I\alpha_{HAC2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HAC3}$
$I\alpha_{HAC3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 149 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de las captaciones superficiales (CS) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las captaciones superficiales (CS) por unidad del parámetro crítico (U_{cH}), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 149 Indicadores de resiliencia hidrológica de las captaciones superficiales (CS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HCS1}$	Dispositivos de alerta de inundación (DA) en elementos críticos definidos de la instalación (%).	Nivel de desarrollo e implantación de dispositivos de alerta DA de inundación para la mitigación de daños físicos y operacionales. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HCS2}$	Suministro eléctrico alternativo (%)	Se refiere a la capacidad de suministro alternativo de energía eléctrica respecto al funcionamiento normal. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HCS3}$	Dispositivos de protección antihumedad (%)	Su medición se efectúa en base al n° de dispositivos de protección IP68 en los puntos críticos de la instalación referenciados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 150 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de las captaciones superficiales (CS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HCS1}$
$I\alpha_{HCS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HCS2}$
$I\alpha_{HCS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	45%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HCS3}$
$I\alpha_{HCS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 151 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de los embalses (EMB) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los embalses (EMB) por unidad del parámetro crítico (U_{cH}), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 151 Indicadores de resiliencia hidrológica de los embalses (EMB)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HEMB1}$	Capacidad adicional de alivio (Hm3).	Capacidad adicional de alivio con relación a la capacidad del embalse en caso de lluvias intensas y/o crecidas (%). Se mide en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{HEMB2}$	Dispositivos de alerta de inundación (DA) en elementos críticos definidos de la instalación.	Nivel de desarrollo e implantación de dispositivos de alerta DA de inundación para la mitigación de daños físicos y operacionales. Se mide en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{HEMB3}$	Dispositivos de protección antihumedad, en los puntos críticos definidos.	Su medición se efectúa en base al n° de dispositivos de protección IP68 en los puntos críticos de la instalación referenciados. Se mide en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 152 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de los embalses (EMB).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HEMB1}$
$I\alpha_{HEMB1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HEMB2}$
$I\alpha_{HEMB2}$	1	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	35%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HEMB3}$
$I\alpha_{HEMB3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 153 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de los estanques (EST) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los estanques (EST) por unidad del parámetro crítico (Uc_H), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 153 Indicadores de resiliencia hidrológica de los estanques (EST)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HEST1}$	Índice de autonomía: agua almacenada (m3) / N° habitantes zona abastecida	Indica la capacidad de abastecimiento adicional en condiciones normales de operación. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HEST2}$	Grado de criticidad en el Sistema (%)	Indica el grado de afectación de la operación de la instalación sobre el resto del Sistema. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HEST3}$	Grado de desarrollo de la Monitorización (Telemando y telecontrol) (%)	Se refiere a la automatización de la instalación y el grado telecontrol de su operación. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 154 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de los estanques (EST).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HEST1}$
$I\alpha_{HEST1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HEST2}$
$I\alpha_{HEST2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HEST3}$
$I\alpha_{HEST3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 155 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas elevadoras de agua potable (PEAP) por unidad del parámetro crítico (U_{CH}), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 155 Indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HPEAP1}$	Dispositivos de alerta de inundación (DA) en elementos críticos definidos de la instalación (%).	Nivel de desarrollo e implantación de dispositivos de alerta DA de inundación para la mitigación de daños físicos y operacionales. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HPEAP2}$	Suministro eléctrico alternativo (%)	Se refiere a la capacidad de suministro alternativo de energía eléctrica respecto al funcionamiento normal. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{HPEAP3}$	Dispositivos de protección antihumedad (%)	Dispositivos de protección eléctrica antihumedad en equipamientos electromecánicos e instalación eléctrica. Su medición se efectúa en base al n° de dispositivos de protección IP68 en los puntos críticos de la instalación referenciados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 156 Rangos y valores de índices de resiliencia hidrológica plantas elevadoras de agua potable (PEAP).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPEAP1}$
$I\alpha_{HPEAP1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPEAP2}$
$I\alpha_{HPEAP2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPEAP3}$
$I\alpha_{HPEAP3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 157 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) por unidad del parámetro crítico (U_{cH}), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 157 Indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HPTAP1}$	Autonomía de funcionamiento (Horas)	Indica la capacidad de producción adicional en condiciones normales de operación.
$I\alpha_{HPTAP2}$	Grado de criticidad en el Sistema.	Indica el grado de afectación de la operación de la instalación sobre el resto del Sistema. Se mide en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HPTAP3}$	Grado de desarrollo de la Monitorización (Telemando y telecontrol).	Se refiere a la automatización de la instalación y el grado telecontrol de su operación. Su medición se realiza mediante el n° de señales monitorizadas respecto al total posibles. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 158 Rangos y valores de índices de resiliencia hidrológica de plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPTAP1}$
$I\alpha_{HPTAP1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPTAP2}$
$I\alpha_{HPTAP2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	45%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPTAP3}$
$I\alpha_{HPTAP3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 159 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de los pozos de captación (PC), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los pozos de captación (PC) por unidad del parámetro crítico (U_{cH}), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 159 Indicadores de resiliencia hidrológica de los pozos de captación (PC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HPC1}$	Dispositivos de alerta de inundación (DA) en elementos críticos definidos de la instalación.	Nivel de desarrollo e implantación de dispositivos de alerta DA de inundación para la mitigación de daños físicos y operacionales. Su medición se realiza relacionando n° de dispositivos instalados en cada punto crítico y el total definidos para su control total. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HPC2}$	Grado de suministro eléctrico alternativo.	Se refiere a la capacidad de suministro alternativo de energía eléctrica respecto al funcionamiento normal. Se mide en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HPC3}$	Dispositivos de protección antihumedad. (%)	Su medición se efectúa en base al n° de dispositivos de protección IP68 en los puntos críticos de la instalación referenciados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 160 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de pozos de captación (PC).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPC1}$
$I\alpha_{HPC1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	45%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPC2}$
$I\alpha_{HPC2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPC3}$
$I\alpha_{HPC3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	25%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 161 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de la red de distribución (RD), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de distribución (RD) por unidad del parámetro crítico (U_{cH}), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 161 Indicadores de resiliencia hidrológica de la red de distribución (RD)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HRD1}$	Nº de uniones acerrojadas/Km de red de distribución.	Se refiere a la tasa de uniones acerrojadas o dúctiles por longitud de red de distribución (km), garantizando su operación. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HRD2}$	Grado de reducción del tiempo medio de reposición del servicio.	Indica la tasa de reducción del tiempo medio de reposición del servicio (anual). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HRD3}$	Nivel de Criticidad en el Sistema.	La criticidad en relación con el grado de alternativa de suministro y población afectada. (%). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 162 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de la red de distribución (RD).

	$0 < r1 \leq 0,05$	$0,05 < r2 \leq 0,10$	$0,10 < r3 \leq 0,15$	$0,15 < r4 \leq 0,20$	$0,20 < r5 \leq 0,25$	$0,25 < r6 \leq 0,30$	$0,30 < r7 \leq 0,35$	$0,35 < r8 \leq 0,40$	$0,40 < r9 \leq 0,45$	$r10 > 0,45$	$W\alpha_{HRD1}$
$I\alpha_{HRD1}$	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	35%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HRD2}$
$I\alpha_{HRD2}$	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,00	40%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HRD3}$
$I\alpha_{HRD3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 163 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de la red de transporte (RT), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de transporte (RT) por unidad del parámetro crítico (U_{cH}), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 163 Indicadores de resiliencia hidrológica de la red de transporte (RT)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HRT1}$	Grado de reducción del tiempo medio de reposición del servicio.	Indica la tasa de reducción del tiempo medio de reposición del servicio (anual). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{HRT2}$	Nivel de Criticidad en el Sistema.	La criticidad en relación con el grado de alternativa de suministro y población afectada. Se mide en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HRT3}$	Nº de uniones acerrojadas/Longitud de aducciones (km).	Se refiere a la tasa de uniones acerrojadas o dúctiles por longitud de red de aducciones (km). Se mide en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 164 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de la red de transporte (RT).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{HRT1}$
$I\alpha_{HRT1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{HRT2}$
$I\alpha_{HRT2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r_1 \leq 0,05$	$0,05 < r_2 \leq 0,10$	$0,10 < r_3 \leq 0,15$	$0,15 < r_4 \leq 0,20$	$0,20 < r_5 \leq 0,25$	$0,25 < r_6 \leq 0,30$	$0,30 < r_7 \leq 0,35$	$0,35 < r_8 \leq 0,40$	$0,40 < r_9 \leq 0,45$	$r_{10} > 0,45$	$W\alpha_{HRT3}$
$I\alpha_{HRT3}$	1	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	30%

Fuente: Elaboración Propia

A.8.1.2. Resiliencia hidrológica del Sistema de Saneamiento

En la Tabla 165 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS) por unidad del parámetro crítico (Uc_H), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 165 Indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HPEAS1}$	Dispositivos de alerta de inundación (DA) en elementos críticos definidos de la instalación.	Nivel de desarrollo e implantación de dispositivos de alerta DA de inundación para la mitigación de daños físicos y operacionales. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HPEAS2}$	Grado de suministro eléctrico alternativo.	Se refiere a la capacidad de suministro alternativo de energía eléctrica respecto al funcionamiento normal. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HPEAS3}$	Dispositivos de protección antihumedad, en los puntos críticos de la instalación.	Su medición se efectúa en base al n° de dispositivos de protección IP68 en los puntos críticos de la instalación referenciados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados

Fuente: Elaboración Propia

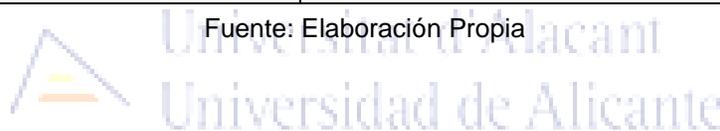


Tabla 166 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPEAS1}$
$I\alpha_{HPEAS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPEAS2}$
$I\alpha_{HPEAS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPEAS3}$
$I\alpha_{HPEAS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 167 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) por unidad del parámetro crítico (U_{cH}), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 167 Indicadores de resiliencia hidrológica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HPTAS1}$	Grado de autonomía de funcionamiento.	Indica la capacidad de producción adicional en condiciones normales de operación. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HPTAS2}$	Grado de criticidad en el Sistema. (Indica el grado de afectación de la operación de la instalación sobre el resto del Sistema. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HPTAS3}$	Grado de desarrollo de la Monitorización (Telemando y telecontrol).	Se refiere a la automatización de la instalación y el grado telecontrol de su operación. Su medición se realiza mediante el n° de señales monitorizadas respecto al total posibles. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 168 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPTAS1}$
$I\alpha_{HPTAS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPTAS2}$
$I\alpha_{HPTAS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	50%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HPTAS3}$
$I\alpha_{HPTAS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 169 se presentan los indicadores de resiliencia hidrológica de la red de alcantarillado (RAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de alcantarillado (RAS) por unidad del parámetro crítico (U_{cH}), luego de eventos de crecida e inundación.

Tabla 169 Indicadores de resiliencia hidrológica de la red de alcantarillado (RAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{HRAS1}$	Nº de uniones flexibles/Km de red de alcantarillado. (Nº/km)	Se refiere a la tasa de uniones flexibles y estancas instaladas, en relación con la longitud de red de alcantarillado (km). Dichas uniones garantizan la operación de la red frente a eventualidades específicas. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{HRAS2}$	Nº de desbordamientos en tiempo seco/Longitud de red de alcantarillado (km). (Nº/km)	Indica la evolución anual de la tasa de desbordamientos en la red de alcantarillado en tiempo seco. Su medición se efectúa en base al nº de desbordamientos constatados en los puntos críticos de la red ya referenciados, y relacionados con la longitud de red en ese y tramo o subcuenta hidráulica. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{HRAS3}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de inundación (DA) en elementos críticos definidos de la instalación	Referido a los dispositivos de alerta DA de inundación para la mitigación de daños físicos y operacionales. Su medición se efectúa en base al número de dispositivos implantados en los puntos críticos de la red asignados, como a los niveles de inundación alcanzados (cm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 170 Rangos y valores de indicadores de resiliencia hidrológica de redes de aguas servidas (RAS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HRAS1}$
$I\alpha_{HRAS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HRAS2}$
$I\alpha_{HRAS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	25%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{HRAS3}$
$I\alpha_{HRAS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

A.8.2. Resiliencia geológica

A.8.2.1. Resiliencia de remoción en masa

En la ecuación (23) se presenta la resiliencia de remoción en masa de la infraestructura i (α_{RMi}), calculada como la suma ponderada ($W\alpha_{RMi}$) de los indicadores de resiliencia de remoción en masa de la infraestructura i ($I\alpha_{RMi}$). Estos medirían la capacidad de respuesta la infraestructura i frente a una amenaza de remoción en masa.

$$\alpha_{RMi}[Uc_{RM} \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{Hi}} W\alpha_{RMil} \cdot I\alpha_{RMil} [Uc_{RM} \cdot Daño^{-1}] \quad (23)$$

A.8.2.1.1. Resiliencia de remoción en masa del Sistema de Abastecimiento

En la Tabla 171 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de los acueductos (AC) considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los acueductos (AC) por unidad del parámetro crítico (Uc_{RM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 171 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de los acueductos (AC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMAC1}$	Grado de implantación de dispositivos de prevención de calidad del agua.	Se refiere al grado de implantación de dispositivos preventivos que impidan una eventual afectación sobre la calidad del agua. Se establece un umbral mínimo de medición de NTU en los dispositivos de alerta preventiva a implantar a la entrada del influente. N° dispositivos y Umbral mínimo de medición. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMAC2}$	Grado de implantación de sistemas de monitoreo.	Se refiere a la observación y medición en tiempo real de niveles de la lámina de agua. N° de sensores y rango de medición (mm), y niveles de alerta (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{RMAC3}$	Grado de implantación de dispositivos de medición la humedad atmosférica (hidrómetros).	Como previsión de nevazones que puedan generar flujo de detritos o aluviones en laderas del embalse, se prevé la instalación de dispositivos de alerta de medición de la humedad atmosférica. Su medición se realiza en base al número de dispositivos localizados en los puntos críticos del tramo de acueducto seleccionado. (N° dispositivos/N° puntos críticos). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 172 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de los acueductos (AC).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMAC1}$
$I\alpha_{RMAC1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	60%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMAC2}$
$I\alpha_{RMAC2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	25%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMAC3}$
$I\alpha_{RMAC3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	15%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 173 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de las captaciones superficiales (CS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las captaciones superficiales (CS) por unidad del parámetro crítico (U_{CRM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 173 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de las captaciones superficiales (CS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMCS1}$	Grado de implantación de dispositivos de prevención de afectación a la calidad del agua.	Se refiere al grado de implantación de dispositivos preventivos que impidan una eventual afectación sobre la calidad del agua. Se establece un umbral mínimo de medición de NTU en los dispositivos de alerta preventiva a implantar a la entrada del influente. (N° dispositivos y Umbral mínimo de medición). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMCS2}$	Grado de implantación de sistemas de monitoreo.	Se refiere a la observación y medición en tiempo real de niveles de la lámina de agua. Su medición se realiza en base al n° de sensores y rango de medición (mm), y niveles de alerta según desplazamiento (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMCS3}$	Grado de adecuación de la instalación a deslizamientos de tierra o aluviones.	Indica el grado de prevención en la operación de la instalación, de eventuales episodios de remoción en masa. Su medición se realiza en base a la disposición de protecciones perimetrales (canales de derivación, diques, y rejas), y de dispositivos de medición de SST, en los puntos críticos determinados previamente. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 174 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de las captaciones superficiales (CS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMCS1}$
$I\alpha_{RMCS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMCS2}$
$I\alpha_{RMCS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	25%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMCS3}$
$I\alpha_{RMCS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 175 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de los embalses (EMB), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los embalses (EMB) por unidad del parámetro crítico (U_{CRM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 175 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de los embalses (EMB)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMEMB1}$	Grado de implantación de dispositivos de movimiento en zonas críticas.	Se refiere a la localización en zonas de laderas, aliviadero y dique de presa de dispositivos de movimiento como previsión de deslizamientos de gran magnitud. Su medición se realiza en base al número de dispositivos de detección de movimiento, rango de movimiento en mm, y puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMEMB2}$	Grado de implantación de sistemas de monitoreo.	Se refiere a la observación y medición en tiempo real de niveles de la lámina de agua. Su medición se realiza en base al n° de sensores y rango de medición (mm), y niveles de alerta (m). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMEMB3}$	Grado de implantación de dispositivos de medición la humedad atmosférica (hidrómetros).	Como previsión de nevazones que puedan generar flujo de detritos o aluviones en laderas del embalse, se prevé la instalación de dispositivos de alerta de medición de la humedad atmosférica. Su medición se realiza en base al número de dispositivos localizados en los puntos críticos del tramo de acueducto seleccionado. (N° dispositivos/N° puntos críticos). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 176 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de los embalses (EMB).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMEMB1}$
$I\alpha_{RMEMB1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	50%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMEMB2}$
$I\alpha_{RMEMB2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMEMB3}$
$I\alpha_{RMEMB3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	15%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 177 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de los estanques (EST), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los estanques (EST) por unidad del parámetro crítico (U_{cRM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 177 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de los estanques (EST)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMEST1}$	Grado de adecuación de la instalación a deslizamientos de tierra o aluviones.	Indica el grado de prevención en la operación de la instalación ante eventuales episodios de remoción en masa. Las medidas de prevención se basan en la disposición de muros perimetrales de altura superior a 2m, puertas estancas del recinto interior y cuneta perimetral exterior al recinto. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMEST2}$	Grado de implantación de sistemas de monitoreo.	Se refiere a la observación y medición en tiempo real de los parámetros de calidad del agua.
$I\alpha_{RMEST3}$	Grado de implantación de dispositivos de aislamiento de la instalación (válvulas automáticas de seccionamiento).	Se refiere al grado de implantación de dispositivos preventivos para evitar la potencial contaminación del agua almacenada. Su medición se realiza en base al número de dispositivos instalado, puntos críticos seleccionados y número de válvulas automáticas de seccionamiento para la función de aislamiento de la instalación). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 178 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de los estanques (EST).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMEST1}$
$I\alpha_{RMEST1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMEST2}$
$I\alpha_{RMEST2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMEST3}$
$I\alpha_{RMEST3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	50%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 179 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas elevadoras de agua potable (PEAP) por unidad del parámetro crítico (U_{CRM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 179 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMPEAP1}$	Grado de implantación de dispositivos de prevención de afectación a la calidad del agua.	Se refiere al grado de implantación de dispositivos preventivos que impidan una eventual afectación sobre la calidad del agua. Se establece un umbral mínimo de medición de NTU en los dispositivos de alerta preventiva a implantar a la entrada del influente. (N° dispositivos y Umbral mínimo). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMPEAP2}$	Grado de implantación de sistemas de monitoreo.	Se refiere a la observación y medición en tiempo real de los parámetros de calidad del agua. Los parámetros para medir en continuo son: conductividad, pH, temperatura, y cloro. Se dispondrán cámaras de TV orientales. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMPEAP3}$	Grado de adecuación de la instalación a deslizamientos de tierra o aluviones.	Indica el grado de prevención en la operación de la instalación ante eventuales episodios de remoción en masa. Las medidas de prevención se basan en la disposición de muros perimetrales de altura superior a 2m, puertas estancas del recinto interior y cuneta perimetral exterior al recinto. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 180 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de plantas elevadoras de agua potable (PEAP).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPEAP1}$
$I\alpha_{RMPEAP1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPEAP2}$
$I\alpha_{RMPEAP2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	25%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPEAP3}$
$I\alpha_{RMPEAP3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 181 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) por unidad del parámetro crítico (U_{CRM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 181 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMPTAP1}$	Grado de capacidad de reserva de agua cruda.	Indica la capacidad adicional de embalse de agua bruta para la operación autónoma de la PTAP durante un periodo de tiempo fijado. Su medición se realiza en base al volumen de agua tratada diaria (m ³ /día).
$I\alpha_{RMPTAP2}$	Grado de capacidad alternativa de tratamiento.	Capacidad de tratamiento adicional en relación con la operación normal. Su medición se realiza en base al caudal medio diario de agua tratada (m ³ /día).
$I\alpha_{RMPTAP3}$	Capacidad de tratamiento según rango de operación de la turbidez (l/s): $Q_t \leq 100$, $100 < Q_t < 1000$, $Q_t \geq 1000$	Representa el nivel o rango de caudales de tratamiento admisible, según el índice de turbidez y la capacidad de tratamiento. Permite prevenir incidencias, variando la producción de agua potable.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 182 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPTAP1}$
$I\alpha_{RMPTAP1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%
	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPTAP2}$
$I\alpha_{RMPTAP2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%
	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPTAP3}$
$I\alpha_{RMPTAP3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 183 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de los pozos de captación (PC), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los pozos de captación (PC) por unidad del parámetro crítico (U_{CRM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 183 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de los pozos de captación (PC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMPC1}$	Grado de implantación de dispositivos de prevención de afectación a la calidad del agua.	Se refiere al grado de implantación de dispositivos preventivos que impidan una eventual afectación sobre la calidad del agua. Se establece un umbral mínimo de medición de NTU en los dispositivos de alerta preventiva a implantar a la entrada del influente.
$I\alpha_{RMPC2}$	Grado de implantación de sistemas de monitoreo.	Se refiere a la observación y medición en tiempo real de los parámetros de calidad del agua. Los parámetros para medir en continuo son: conductividad, pH, temperatura, y cloro. Se dispondrán cámaras de TV orientales.
$I\alpha_{RMPC3}$	Grado de adecuación de la instalación a deslizamientos de tierra o aluviones.	Indica el grado de prevención en la operación de la instalación ante eventuales episodios de remoción en masa. Las medidas de prevención se basan en la disposición de muros perimetrales de altura superior a 2m, puertas estancas del recinto interior y cuneta perimetral exterior al recinto.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 184 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de los pozos de captación (PC).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPC1}$
$I\alpha_{RMPC1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPC2}$
$I\alpha_{RMPC2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	25%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPC3}$
$I\alpha_{RMPC3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 185 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de distribución (RD), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de distribución (RD) por unidad del parámetro crítico (U_{CRM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 185 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de distribución (RD)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMRD1}$	Grado de implantación de dispositivos de prevención de calidad del agua.	Se refiere al grado de implantación de dispositivos preventivos que impidan una eventual afectación sobre la calidad del agua. Se establece un umbral mínimo de medición de NTU en los dispositivos de alerta preventiva a implantar a la entrada del influente.
$I\alpha_{RMRD2}$	Grado de implantación de sistemas de monitoreo.	Se refiere a la medición en tiempo real, en línea, de los parámetros de calidad del agua. Los parámetros que medir en continuo son: conductividad, pH, temperatura, y cloro.
$I\alpha_{RMRD3}$	Grado de adecuación de la instalación a deslizamientos de tierra o aluviones.	Indica el grado de prevención en la operación de la instalación ante eventuales episodios de remoción en masa. Las medidas de prevención se basan en la localización y protección de los dispositivos de control a altura superior a 1 m respecto de la rasante terreno.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 186 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de distribución (RD).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMRD1}$
$I\alpha_{RMRD1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%
	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMRD2}$
$I\alpha_{RMRD2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%
	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMRD3}$
$I\alpha_{RMRD3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 187 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de transporte (RT), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de transporte (RT) por unidad del parámetro crítico (U_{CRM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 187 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de transporte (RT)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMRT1}$	Grado de implantación de dispositivos de movimiento en juntas en la red de transporte.	Dispositivos de control de movimiento en juntas de la red de transporte para control de calidad del agua. Se mide por número de tramos críticos, con un umbral máximo de movimiento longitudinal y transversal (mm)
$I\alpha_{RMRT2}$	Grado de implantación de sistemas de monitoreo.	Se refiere a la medición en tiempo real en línea, de los parámetros de calidad del agua. Los parámetros para medir en continuo son: conductividad, pH, temperatura, y cloro.
$I\alpha_{RMRT3}$	Grado de adecuación de la instalación a deslizamientos de tierra o aluviones.	Indica el grado de prevención en la operación de la instalación ante eventuales episodios de remoción en masa. Las medidas de prevención se basan en la localización y protección de los dispositivos de control a altura superior a 1 m respecto de la rasante del pavimento.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 188 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de transporte (RT).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMRT1}$
$I\alpha_{RMRT1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMRT2}$
$I\alpha_{RMRT2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMRT3}$
$I\alpha_{RMRT3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

A.8.2.1.2. Resiliencia de remoción en masa del Sistema de Saneamiento

En la Tabla 189 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS) por unidad del parámetro crítico (U_{CRM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 189 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas elevadoras de aguas servidas.

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMPEAS1}$	Grado de implantación de dispositivos de aislamiento de la instalación.	Mediante el desvío o alivio de caudales de entrada se mitiga la generación de daños en la instalación. La medición de este indicador se efectuará en base al caudal aliviado respecto al caudal medio de operación. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMPEAS2}$	Grado de adecuación de la instalación a deslizamientos de tierra o aluviones.	Indica el grado de prevención en la operación de la instalación ante eventuales episodios de remoción en masa. Las medidas de prevención se basan en la disposición de muros perimetrales de altura superior a 2m, puertas estancas del recinto interior y cuneta perimetral exterior al recinto. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMPEAS3}$	Grado de implantación de Infraestructura de sedimentación (arenero), en m3.	Instalación de un elemento de sedimentación de detritos generados por los aluviones a la entrada de la instalación que permita la decantación del caudal de entrada. Se medirá según su capacidad (m3), y su rendimiento se analizará según los Kg de sedimentos recogidos por m3 de agua a la entrada de la instalación. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 190 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPEAS1}$
$I\alpha_{RMPEAS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPEAS2}$
$I\alpha_{RMPEAS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPEAS3}$
$I\alpha_{RMPEAS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 191 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) por unidad del parámetro crítico (U_{CRM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 191 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMPTAS1}$	Grado de adecuación de la instalación a deslizamientos de tierra o aluviones.	Indica el grado de prevención en la operación de la instalación ante eventuales episodios de remoción en masa. Las medidas de prevención se basan en la localización y protección de los dispositivos de control a altura superior a 1 m respecto de la rasante terreno. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMPTAS2}$	Grado de implantación de dispositivos de aislamiento de la instalación (válvulas automáticas de seccionamiento).	Se refiere al grado de implantación de dispositivos preventivos en caso de obstrucción de los equipos de regulación y control del influente. Se mide según el número de paradas de la instalación por motivo de obstrucción de equipos (n°). (N° paradas/N° equipos). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{RMPTAS3}$	Grado de implantación de dispositivos de alivio de caudal.	Implantación de dispositivos de alivio, previos a la entrada a la PTAS. Consiste en disponer el desvío de caudales generados por aluviones preservando la integridad de la instalación. Se mide en base al caudal aliviado en un evento (l/s) respecto al caudal medio de entrada a la planta (l/s). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 192 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPTAS1}$
$I\alpha_{RMPTAS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPTAS2}$
$I\alpha_{RMPTAS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	45%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{RMPTAS3}$
$I\alpha_{RMPTAS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 193 se presentan los indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de alcantarillado (RAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de alcantarillado (RAS) por unidad del parámetro crítico (U_{CRM}), luego de eventos de remoción en masa.

Tabla 193 Indicadores de resiliencia de remoción en masa de la red de alcantarillado (RAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{RMRAS1}$	Grado de implantación de equipamiento de alivio de caudales.	Se refiere a infraestructura adicional de decantación de sedimentos y de desvío de caudales. Se mide según el caudal de alivio (l/s), respecto al caudal medio (l/s). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{RMRAS2}$	Grado de implantación de sistemas de monitoreo.	Se refiere a la medición en tiempo real en línea, de los parámetros de calidad del agua y variables operacionales. Los parámetros para medir en continuo son: conductividad, pH, temperatura, calado o nivel de agua, sulfatos, nitrógeno total, cloruros, y fósforo total. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados
$I\alpha_{RMRAS3}$	Grado de adecuación de la instalación a deslizamientos de tierra o aluviones.	Indica el grado de prevención en la operación de la instalación ante eventuales episodios de remoción en masa. Las medidas de prevención se basan en la localización y protección de los dispositivos de control a altura superior a 1 m respecto de la rasante del pavimento. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 194 Rangos y valores de indicadores de resiliencia de remoción en masa de red de aguas servidas (RAS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMRAS1}$
$I\alpha_{RMRAS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMRAS2}$
$I\alpha_{RMRAS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{RMRAS3}$
$I\alpha_{RMRAS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	50%

Fuente: Elaboración Propia

A.8.2.2. Resiliencia sísmica

En la ecuación (24) se presenta la resiliencia sísmica de la infraestructura i (α_{SMi}), calculada como la suma ponderada ($W\alpha_{SMil}$) de los indicadores de resiliencia sísmica de la infraestructura i ($I\alpha_{SMil}$). Estos medirían la capacidad de respuesta la infraestructura i frente a una amenaza sísmica.

$$\alpha_{SMi}[Uc_{SM} \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{LHi} W\alpha_{SMil} \cdot I\alpha_{SMil} [Uc_{SM} \cdot Daño^{-1}] \quad (24)$$

A.8.2.2.1. Resiliencia de remoción en masa del Sistema de Abastecimiento

En la Tabla 195 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de los acueductos (AC), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los acueductos (AC) por unidad del parámetro crítico (Uc_{SM}), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 195 Indicadores de resiliencia sísmica de los acueductos (AC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{SMAC1}$	Grado de implantación de soluciones antisísmicas en la infraestructura.	Se refiere a los dispositivos antisísmicos de absorción de vibraciones implantados en la red de acueductos, mitigando o anulando las afecciones sobre la infraestructura. Se mide según el n° de dispositivos y la longitud de máxima de desplazamiento en mm. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMAC2}$	Grado de implantación de sensores de movimiento en juntas.	En relación con la instalación de sensores de movimiento en uniones y juntas de acueducto. Se mide según la longitud máxima de desplazamiento admisible en mm. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMAC3}$	Disposición de uniones flexibles (n°)/ Uniones totales por tramo de acueducto (n°).	Uniones flexibles de absorción de movimientos por tramo de acueducto. Se mide según el n° de uniones flexibles y la longitud de máxima de desplazamiento admisible en mm. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 196 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica en acueductos (AC).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMAC1}$
$I\alpha_{SMAC1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMAC2}$
$I\alpha_{SMAC2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMAC3}$
$I\alpha_{SMAC3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 197 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de las captaciones superficiales (CS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las captaciones superficiales (CS) por unidad del parámetro crítico (U_{CSM}), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 197 Indicadores de resiliencia sísmica de las captaciones superficiales (CS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{SMCS1}$	Grado de actualización de soluciones antisísmicas en la infraestructura.	Se refiere a las soluciones estructurales avanzadas dispuestas, en base a la evolución de la normativa antisísmica. Su medición se realiza según el número de puntos críticos específicos de la infraestructura y el número de dispositivos de absorción de energía instalados (aislador o disipador). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMCS2}$	Tasa de material dúctil en tuberías.	Representa la naturaleza del material respecto a su grado de ductilidad en %. Permite conocer la probabilidad de falla de las tuberías de la instalación según su naturaleza material. Se mide según porcentajes de tubería de material dúctil respecto al total. (m/m). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMCS3}$	Grado de aplicación de dispositivos antisísmicos en la infraestructura hidráulica.	Establece la aplicación de dispositivos de absorción de energía en los puntos críticos de la instalación hidráulica. Su aplicación, mitiga los daños o pérdida de operación de la instalación. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 198 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de las captaciones superficiales (CS).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{SMCS1}}$
$I_{\alpha_{SMCS1}}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{SMCS2}}$
$I_{\alpha_{SMCS2}}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	20%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{SMCS3}}$
$I_{\alpha_{SMCS3}}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 199 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de los embalses (EMB), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los embalses (EMB) por unidad del parámetro crítico (U_{cSM}), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 199 Indicadores de resiliencia sísmica de los embalses (EMB)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I_{\alpha_{SMEMB1}}$	Grado de implantación de dispositivos antisísmicos en elementos de control y regulación de la operación de la infraestructura.	En base a los puntos críticos de la instalación, se mide el n° de dispositivos implantados en los elementos de absorción de energía en equipamiento electromecánico y su tipología (activos o pasivos). (N° puntos críticos/N° de dispositivos/ Tipología de dispositivo). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I_{\alpha_{SMEMB2}}$	Grado de actualización de soluciones antisísmicas en la infraestructura. (%).	Se refiere a las soluciones estructurales avanzadas dispuestas, en base a la evolución de la normativa antisísmica. Su medición se realiza según el número de puntos críticos específicos de la infraestructura y el número de dispositivos de absorción de energía instalados (aislador o disipador). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I_{\alpha_{SMEMB3}}$	Tasa de uniones dúctiles, y naturaleza dúctil del material en canalizaciones.	Representa la naturaleza de la unión respecto a su grado de ductilidad en %. Permite conocer la probabilidad de falla de las tuberías de la instalación según la tipología de la unión y su naturaleza material. (Prob. Falla/% uniones dúctiles/ naturaleza dúctil del material.). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 200 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de los embalses (EMB).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{SMEMB1}$
$I\alpha_{SMEMB1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	45%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{SMEMB2}$
$I\alpha_{SMEMB2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{SMEMB3}$
$I\alpha_{SMEMB3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	25%

Material (M)	AC	FFG	HS	PVC	HA	PE	FD	ACERO
Factor W	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,40	0,30	0,20

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 201 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de los estanques (EST), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los estanques (EST) por unidad del parámetro crítico ($U_{c_{SM}}$), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 201 Indicadores de resiliencia sísmica de los estanques (EST)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{SMEST1}$	Grado de disponibilidad de alternativa de suministro eléctrico alternativo.	Suministro eléctrico alternativo para la capacidad normal de operación. Se mide con relación a la potencia eléctrica alternativa disponible respecto a la potencia eléctrica dispuesta para un suministro normal de la instalación. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMEST2}$	% uniones dúctiles, y naturaleza dúctil del material en canalizaciones.	Representa la naturaleza de la unión respecto a su grado de ductilidad en %. Permite conocer la probabilidad de falla de las tuberías de la instalación según la tipología de la unión y su naturaleza material. (Probabilidad falla/% uniones dúctiles/ naturaleza dúctil del material). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMEST3}$	Grado de aplicación de dispositivos antisísmicos en la infraestructura hidráulica.	Establece la aplicación de dispositivos de absorción de energía en los puntos críticos de la instalación hidráulica. Ello, mitiga los daños o pérdida de operación de la instalación. Se mide en número de dispositivos instalado en los puntos críticos determinados y rango de absorción de energía (IMM). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 202 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de los estanques (EST).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMEST1}$
$I\alpha_{SMEST1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMEST2}$
$I\alpha_{SMEST2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMEST3}$
$I\alpha_{SMEST3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 203 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas elevadoras de agua potable (PEAP) por unidad del parámetro crítico (Uc_{SM}), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 203 Indicadores de resiliencia sísmica de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{SMPEAP1}$	Grado de actualización de soluciones antisísmicas en la infraestructura.	Se refiere a las soluciones estructurales avanzadas dispuestas, en base a la evolución de la normativa antisísmica. Su medición se realiza según el número de puntos críticos específicos de la infraestructura y el número de dispositivos de absorción de energía instalados (aislador o disipador). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMPEAP2}$	% uniones dúctiles, y naturaleza dúctil del material en canalizaciones.	Representa la naturaleza de la unión respecto a su grado de ductilidad en %. Permite conocer la probabilidad de falla de las tuberías de la instalación según la tipología de la unión y su naturaleza material. (Probabilidad falla/% uniones dúctiles/ naturaleza dúctil del material). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMPEAP3}$	Grado de aplicación de dispositivos antisísmicos en la infraestructura hidráulica.	Establece la aplicación de dispositivos de absorción de energía en los puntos críticos de la instalación hidráulica. Ello, mitiga los daños o pérdida de operación de la instalación. Se mide en número de dispositivos instalado en los puntos críticos determinados y rango de absorción de energía (IMM). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 204 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de plantas elevadoras de agua potable (PEAP).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPEAP1}$
$I\alpha_{SMPEAP1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPEAP2}$
$I\alpha_{SMPEAP2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPEAP3}$
$I\alpha_{SMPEAP3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 205 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) por unidad del parámetro crítico (Uc_{SM}), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 205 Indicadores de resiliencia sísmica de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{SMPTAP1}$	Grado de disponibilidad de alternativa de suministro eléctrico alternativo.	Grado de suministro alternativo de energía eléctrica (diferente fuente convencional, o energía renovable). Se mide con relación a la potencia eléctrica alternativa disponible respecto a la potencia eléctrica dispuesta para un suministro normal de la instalación. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados,
$I\alpha_{SMPTAP2}$	Grado de actualización de soluciones antisísmicas en la infraestructura.	Se refiere a las soluciones estructurales avanzadas dispuestas, en base a la evolución de la normativa antisísmica. Su medición se realiza según el número de puntos críticos específicos de la infraestructura y el número de dispositivos de absorción de energía instalados (aislador o disipador). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMPTAP3}$	Grado de aplicación de dispositivos antisísmicos en la infraestructura hidráulica.	Establece la aplicación de dispositivos de absorción de energía en los puntos críticos de la instalación hidráulica. Ello, mitiga los daños o pérdida de operación de la instalación. Se mide en número de dispositivos instalado en los puntos críticos determinados y rango de absorción de energía (IMM). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 206 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPTAP1}$
$I\alpha_{SMPTAP1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPTAP2}$
$I\alpha_{SMPTAP2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPTAP3}$
$I\alpha_{SMPTAP3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 207 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de los pozos de captación (PC), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los pozos de captación (PC) por unidad del parámetro crítico (U_{cSM}), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 207 Indicadores de resiliencia sísmica de los pozos de captación (PC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{SMPC1}$	Grado de actualización de soluciones antisísmicas en la infraestructura.	Se refiere a las soluciones estructurales avanzadas dispuestas, en base a la evolución de la normativa antisísmica. En base a los puntos críticos de la instalación, se mide el n° de dispositivos de absorción de energía implantados en equipamiento electromecánico y su tipología (activos o pasivos). (N° puntos críticos/N° de dispositivos/ Tipología de dispositivo). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMPC2}$	% uniones dúctiles, y naturaleza dúctil del material en canalizaciones.	Representa la naturaleza de la unión respecto a su grado de ductilidad en %. Permite conocer la probabilidad de falla de las tuberías de la instalación según la tipología de la unión y su naturaleza material. (Probabilidad falla/% uniones dúctiles/ naturaleza dúctil del material). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMPC3}$	Grado de aplicación de dispositivos antisísmicos en la infraestructura hidráulica.	Establece la aplicación de dispositivos de absorción de energía en los puntos críticos de la instalación hidráulica. Ello, mitiga los daños o pérdida de operación de la instalación. Se mide en número de dispositivos instalado en los puntos críticos determinados y rango de absorción de energía (IMM). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 208 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de los pozos de captación (PC).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPC1}$
$I\alpha_{SMPC1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPC2}$
$I\alpha_{SMPC2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPC3}$
$I\alpha_{SMPC3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 209 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de la red de distribución (RD), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de distribución (RD) por unidad del parámetro crítico (U_{cSM}), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 209 Indicadores de resiliencia sísmica de la red de distribución (RD)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{SMRD1}$	Grado de implantación de soluciones antisísmicas en la infraestructura.	Se refiere a los dispositivos antisísmicos implantados en la red de distribución. En base a los puntos críticos de la red de distribución, se mide el n° de dispositivos de absorción de energía implantados en equipamiento electromecánico y su tipología (activos o pasivos). (N° puntos críticos/N° de dispositivos/ Tipología de dispositivo). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMRD2}$	Grado de actualización de soluciones antisísmicas en la infraestructura.	Se refiere a las soluciones estructurales avanzadas dispuestas, en base a la evolución de la normativa antisísmica. Su medición se realiza según el número de puntos críticos específicos de la infraestructura y el número de dispositivos de absorción de energía instalados (aislador o disipador). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMRD3}$	% uniones dúctiles, y naturaleza dúctil del material en canalizaciones.	Representa la naturaleza de la unión respecto a su grado de ductilidad en %. Permite conocer la probabilidad de falla de las tuberías de la instalación según la tipología de la unión y su naturaleza material. (Probabilidad falla/% uniones dúctiles/ naturaleza dúctil del material. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 210 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de red de la distribución (RD)

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{SMRD1}}$
$I\alpha_{SMRD1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{SMRD2}}$
$I\alpha_{SMRD2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{SMRD3}}$
$I\alpha_{SMRD3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 211 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de la red de transporte (RT), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de transporte (RT) por unidad del parámetro crítico ($U_{c_{SM}}$), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 211 Indicadores de resiliencia sísmica de la red de transporte (RT)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{SMRT1}$	Grado de implantación de soluciones antisísmicas en la infraestructura.	Se refiere a los dispositivos antisísmicos implantados en la red de transporte. En base a los puntos críticos de la red de transporte, se mide el n° de dispositivos de absorción de energía implantados en equipamiento electromecánico y su tipología (activos o pasivos). (N° puntos críticos/N° de dispositivos/ Tipología de dispositivo). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados,
$I\alpha_{SMRT2}$	N° de uniones flexibles/N° de uniones totales por tramo de red de transporte.	Se refiere a las uniones de tubería que ayudan a absorber los movimientos diferenciales, causados por un sismo. Se mide en tasa de uniones flexibles respecto al total de uniones de la red de transporte. (N° uniones flexibles/ N° uniones totales). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMRT3}$	% uniones dúctiles, y naturaleza dúctil del material en canalizaciones.	Representa la naturaleza de la unión respecto a su grado de ductilidad en %. Permite conocer la probabilidad de falla de las tuberías de la instalación según la tipología de la unión y su naturaleza material. (Probabilidad falla/% uniones dúctiles/ naturaleza dúctil del material). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 212 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de la red de transporte (RT).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{SMRT1}}$
$I\alpha_{SMRT1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{SMRT2}}$
$I\alpha_{SMRT2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{SMRT3}}$
$I\alpha_{SMRT3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

Fuente: Elaboración Propia

A.8.2.2.2 Resiliencia sísmica del Sistema de Saneamiento

En la Tabla 213 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS) por unidad del parámetro crítico (U_{CSM}), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 213 Indicadores de resiliencia sísmica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{SMPEAS1}$	Grado de actualización de soluciones antisísmicas en la infraestructura.	Se refiere a las soluciones estructurales avanzadas dispuestas, en base a la evolución de la normativa antisísmica. Su medición se realiza según el número de puntos críticos específicos de la infraestructura y el número de dispositivos de absorción de energía instalados (aislador o disipador). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMPEAS2}$	% uniones dúctiles, y naturaleza dúctil del material en canalizaciones.	Representa la naturaleza de la unión respecto a su grado de ductilidad en %. Permite conocer la probabilidad de falla de las tuberías de la instalación según la tipología de la unión y su naturaleza material. (Probabilidad falla/% uniones dúctiles/ naturaleza dúctil del material). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMPEAS3}$	Grado de aplicación de dispositivos antisísmicos en la infraestructura hidráulica.	Establece la aplicación de dispositivos de absorción de energía en los puntos críticos de la instalación hidráulica. Ello, mitiga los daños o pérdida de operación de la instalación. Se mide en número de dispositivos instalado en los puntos críticos determinados y rango de absorción de energía (IMM). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 214 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPEAS1}$
$I\alpha_{SMPEAS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPEAS2}$
$I\alpha_{SMPEAS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

Material (M)	AC	FFG	HS	PVC	HA	FD	ACERO	PE
Factor W	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,40	0,30	0,20

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPEAS3}$
$I\alpha_{SMPEAS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 215 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) por unidad del parámetro crítico (U_{CSM}), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 215 Indicadores de resiliencia sísmica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{SMPTAS1}$	Grado de disponibilidad de alternativa de suministro eléctrico alternativo.	Grado de suministro alternativo de energía eléctrica (diferente fuente convencional, o energía renovable). Se mide con relación a la potencia eléctrica alternativa disponible respecto a la potencia eléctrica dispuesta para un suministro normal de la instalación. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMPTAS2}$	Grado de actualización de soluciones antisísmicas en la infraestructura.	Se refiere a las soluciones estructurales avanzadas dispuestas, en base a la evolución de la normativa antisísmica. Su medición se realiza según el número de puntos críticos específicos de la infraestructura y el número de dispositivos de absorción de energía instalados (aislador o disipador). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMPTAS3}$	Grado de aplicación de dispositivos antisísmicos en la infraestructura hidráulica.	Establece la aplicación de dispositivos de absorción de energía en los puntos críticos de la instalación hidráulica. Su aplicación, mitiga los daños o pérdida de operación de la instalación. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 216 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPTAS1}$
$I\alpha_{SMPTAS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPTAS2}$
$I\alpha_{SMPTAS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMPTAS3}$
$I\alpha_{SMPTAS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 217 se presentan los indicadores de resiliencia sísmica de la red de alcantarillado (RAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de alcantarillado (RAS) por unidad del parámetro crítico ($U_{c_{SM}}$), luego de eventos de sismicidad.

Tabla 217 Indicadores de resiliencia sísmica de la red de alcantarillado (RAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{SMRAS1}$	Grado de actualización de soluciones antisísmicas en la infraestructura.	Se refiere a las soluciones estructurales avanzadas dispuestas, en base a la evolución de la normativa antisísmica. Su medición se realiza según el número de puntos críticos específicos de la infraestructura y el número de dispositivos de absorción de energía instalados (aislador o disipador). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMRAS2}$	% uniones dúctiles, y naturaleza dúctil del material en canalizaciones.	Representa la naturaleza de la unión respecto a su grado de ductilidad en %. Permite conocer la probabilidad de falla de las tuberías de la instalación según la tipología de la unión y su naturaleza material. (Prob. Falla/% uniones dúctiles/ naturaleza dúctil del material.). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{SMRAS3}$	Nº de uniones flexibles/Nº de uniones totales por tramo de red de alcantarillado.	Se refiere a las uniones de tubería que ayudan a absorber los movimientos diferenciales, causados por un sismo. Se mide en tasa de uniones flexibles respecto al total de uniones de la red de alcantarillado. (Nº uniones flexibles/ Nº uniones totales). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 218 Rangos y valores de indicadores de resiliencia sísmica de la red de aguas servidas (RAS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMRAS1}$
$I\alpha_{SMRAS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMRAS2}$
$I\alpha_{SMRAS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMRAS3}$
$I\alpha_{SMRAS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	35%

Fuente: Elaboración Propia

A.8.2.3. Resiliencia volcánica

En la ecuación (25) se presenta la resiliencia volcánica de la infraestructura i (α_{vi}), calculada como la suma ponderada ($W\alpha_{vil}$) de los indicadores de resiliencia volcánica de la infraestructura i ($I\alpha_{vil}$). Estos medirían la capacidad de respuesta la infraestructura i frente a una amenaza volcánica.

$$\alpha_{vi}[Uc_v \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{Hi}} W\alpha_{vil} \cdot I\alpha_{vil} [Uc_v \cdot Daño^{-1}] \quad (25)$$

A.8.2.3.1 Resiliencia volcánica del Sistema de Abastecimiento

En la Tabla 219 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de los acueductos (AC), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los acueductos (AC) por unidad del parámetro crítico (Uc_v), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 219 Indicadores de resiliencia volcánica de los acueductos (AC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VAC1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de sensores.	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Permiten garantizar la funcionalidad de estos. Su medición se realiza en base al número de dispositivos de protección se sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VAC2}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos.	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas del tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VAC3}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico.	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa de los mismos, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 220 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de los acueductos (AC).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VAC1}$
$I\alpha_{VAC1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VAC2}$
$I\alpha_{VAC2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VAC3}$
$I\alpha_{VAC3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 221 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de las captaciones superficiales (CS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las captaciones superficiales (CS) por unidad del parámetro crítico (U_{cV}), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 221 Indicadores de resiliencia volcánica de las captaciones superficiales (CS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VCS1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de sensores.	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Permiten garantizar la funcionalidad de estos. Su medición se realiza en base al número de dispositivos de protección se sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VCS2}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos.	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas del tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VCS3}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico.	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa de los mismos, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 222 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de captaciones superficiales (CS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VCS1}$
$I\alpha_{VCS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VCS2}$
$I\alpha_{VCS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VCS3}$
$I\alpha_{VCS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 223 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de los embalses (EMB), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los embalses (EMB) por unidad del parámetro crítico (U_{CV}), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 223 Indicadores de resiliencia volcánica de los embalses (EMB)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VEMB1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de sensores.	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Permiten garantizar la funcionalidad de estos. Su medición se realiza en base al número de dispositivos de protección se sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VEMB2}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico.	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa de los mismos, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VEMB3}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos.	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas del tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 224 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de los embalses (EMB).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{VEMB1}$
$I\alpha_{VEMB1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{VEMB2}$
$I\alpha_{VEMB2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{VEMB3}$
$I\alpha_{VEMB3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 225 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de los estanques (EST), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los estanques (EST) por unidad del parámetro crítico (U_{cV}), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 225 Indicadores de resiliencia volcánica de los estanques (EST)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VEST1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de sensores.	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Permiten garantizar la funcionalidad de estos. Su medición se realiza en base al número de dispositivos de protección de sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VEST2}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas del tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VEST3}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa de los mismos, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 226 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de los estanques (EST).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{VEST1}$
$I\alpha_{VEST1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{VEST2}$
$I\alpha_{VEST2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W\alpha_{VEST3}$
$I\alpha_{VEST3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 227 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas elevadoras de agua potable (PEAP) por unidad del parámetro crítico (U_{cV}), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 227 Indicadores de resiliencia volcánica de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VPEAP1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de sensores.	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Permiten garantizar la funcionalidad de estos. Su medición se realiza en base al número de dispositivos de protección de sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VPEAP2}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos.	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas del tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VPEAP3}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 228 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de las plantas elevadoras de agua potable (PEAP).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W^{\alpha_{VPEAP1}}$
$I\alpha_{VPEAP1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W^{\alpha_{VPEAP2}}$
$I\alpha_{VPEAP2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W^{\alpha_{VPEAP3}}$
$I\alpha_{VPEAP3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 229 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) por unidad del parámetro crítico (U_{CV}), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 229 Indicadores de resiliencia volcánica de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VPTAP1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de sensores de la infraestructura (lahares).	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Permiten garantizar la funcionalidad de estos. Su medición se realiza en base al número de dispositivos de protección se sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VPTAP2}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos.	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas del tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VPTAP3}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico.	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 230 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VPTAP1}$
$I\alpha_{VPTAP1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VPTAP2}$
$I\alpha_{VPTAP2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VPTAP3}$
$I\alpha_{VPTAP3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 231 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de los pozos de captación (PC), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en los pozos de captación (PC) por unidad del parámetro crítico (U_{cV}), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 231 Indicadores de resiliencia volcánica de los pozos de captación (PC)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VPC1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de sensores.	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Permiten garantizar la funcionalidad de estos. Su medición se realiza en base al número de dispositivos de protección se sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VPC2}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos.	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas del tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VPC3}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico.	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 232 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de los pozos de captación (PC).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W_{\alpha_{VPC1}}$
$I\alpha_{VPC1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W_{\alpha_{VPC2}}$
$I\alpha_{VPC2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W_{\alpha_{VPC3}}$
$I\alpha_{VPC3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 233 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de la red de distribución (RD), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de distribución (RD) por unidad del parámetro crítico (U_{cV}), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 233 Indicadores de resiliencia volcánica de la red de distribución (RD)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VRD1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de sensores.	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Permiten garantizar la funcionalidad de estos. Su medición se realiza en base al número de dispositivos de protección de sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VRD2}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos.	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas del tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VRD3}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico.	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa de los mismos, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 234 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de la red de distribución (RD).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VRD1}$
$I\alpha_{VRD1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VRD2}$
$I\alpha_{VRD2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VRD3}$
$I\alpha_{VRD3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 235 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de la red de transporte (RT), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de transporte (RT) por unidad del parámetro crítico (U_{cV}), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 235 Indicadores de resiliencia volcánica de la red de transporte (RT)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VRT1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de sensores.	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Permiten garantizar la funcionalidad de estos. Su medición se realiza en base al número de dispositivos de protección de sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VRT2}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos.	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas del tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VRT3}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico.	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 236 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de la red de transporte (RT).

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{VRT1}}$
$I\alpha_{VRT1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{VRT2}}$
$I\alpha_{VRT2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

	$0 < r_1 \leq 0,10$	$0,10 < r_2 \leq 0,20$	$0,20 < r_3 \leq 0,30$	$0,30 < r_4 \leq 0,40$	$0,40 < r_5 \leq 0,50$	$0,50 < r_6 \leq 0,60$	$0,60 < r_7 \leq 0,70$	$0,70 < r_8 \leq 0,80$	$0,80 < r_9 \leq 0,90$	$0,90 < r_{10} \leq 1,0$	$W_{\alpha_{VRT3}}$
$I\alpha_{VRT3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia



A.8.2.3.2 Resiliencia volcánica del Sistema de Saneamiento

En la Tabla 237 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS) por unidad del parámetro crítico (U_{Cv}), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 237 Indicadores de resiliencia volcánica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VPEAS1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de sensores.	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Permiten garantizar la funcionalidad de estos. Su medición se realiza en base al número de dispositivos de protección de sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VPEAS2}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos.	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas del tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VPEAS3}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico.	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa de los mismos, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 238 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de las plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMRT1}$
$I\alpha_{SMRT1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMRT2}$
$I\alpha_{SMRT2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{SMRT3}$
$I\alpha_{SMRT3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 239 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) por unidad del parámetro crítico (U_{Cv}), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 239 Indicadores de resiliencia volcánica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VPTAS1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de la infraestructura (lahares).	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Se mide en base al número de dispositivos de protección de sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VPTAS2}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos.	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas del tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VPTAS3}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico.	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 240 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VPTAS1}$
$I\alpha_{VPTAS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VPTAS2}$
$I\alpha_{VPTAS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VPTAS3}$
$I\alpha_{VPTAS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 241 se presentan los indicadores de resiliencia volcánica de la red de alcantarillado (RAS), considerados en este estudio. Estos indicadores medirían el daño provocado en la red de alcantarillado (RAS) por unidad del parámetro crítico (U_{c_v}), luego de eventos de erupción volcánica.

Tabla 241 Indicadores de resiliencia volcánica de la red de alcantarillado (RAS)

Denominación	Nombre del indicador	Descripción
$I\alpha_{VRAS1}$	Grado de desarrollo de dispositivos de protección de sensores.	Elementos de protección de los sensores de operación de los equipamientos críticos de la instalación. Se mide en base al número de dispositivos de protección de sensores/ n° de sensores totales/ puntos críticos de la instalación determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VRAS2}$	Grado de implantación de dispositivos de alerta de la recepción de cenizas o piroclastos.	Los dispositivos de alerta en juntas de acueducto, por caída de piroclastos. Permite mantener en ciertas condiciones la operación de la instalación, y mitigar daños en ella. Se mide por el n° de juntas tramo de acueducto/ n° de dispositivos de alerta y rango de abertura (mm). Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.
$I\alpha_{VRAS3}$	Grado de implantación de elementos de protección de equipamiento hidráulico.	Dispositivos o elementos que protegen los equipos hidráulicos de regulación y control de la operación. Su implementación garantiza la continuidad operativa, ya que evita la rotura o anulación de la funcionalidad de los equipos. Se mide por el n° de equipos de protección/n° de puntos críticos determinados. Se evalúa en base a los rangos del indicador y valores asignados.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 242 Rangos y valores de indicadores de resiliencia volcánica de la red de aguas servidas (RAS).

	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VRAS1}$
$I\alpha_{VRAS1}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VRAS2}$
$I\alpha_{VRAS2}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	30%
	$0 < r1 \leq 0,10$	$0,10 < r2 \leq 0,20$	$0,20 < r3 \leq 0,30$	$0,30 < r4 \leq 0,40$	$0,40 < r5 \leq 0,50$	$0,50 < r6 \leq 0,60$	$0,60 < r7 \leq 0,70$	$0,70 < r8 \leq 0,80$	$0,80 < r9 \leq 0,90$	$0,90 < r10 \leq 1,0$	$W\alpha_{VRAS3}$
$I\alpha_{VRAS3}$	1	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	40%

Fuente: Elaboración Propia

