



GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DESARROLLO DE UN ÍNDICE DE RIESGO DE AMENAZAS NATURALES QUE AFECTAN A LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE



CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	6
2	ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE AMENAZAS NATURALES	8
2.1	Amenaza Sísmica	8
2.2	Amenaza de Tsunami	11
2.3	Amenaza de Inundación Fluvial	16
2.4	Amenaza de Aluvión	18
2.5	Amenaza de Remoción en Masa	19
2.6	Amenaza de Turbidez	21
3	ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD OPERACIONAL	24
3.1	Vulnerabilidad ante Amenaza Sísmica	24
3.2	Vulnerabilidad ante Amenaza de Tsunami	29
3.3	Vulnerabilidad ante Amenaza de Inundación Fluvial	30
3.4	Vulnerabilidad ante Amenaza de Aluvión	33
3.5	Vulnerabilidad ante Amenaza de Remoción en Masa	33
3.6	Vulnerabilidad ante Amenaza de Turbidez	33
4	METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE	37
4.1	Índice de riesgo	37
4.2	Matriz de riesgo	39
5	REFERENCIAS	42

MOTIVACIÓN

Con motivo de la Tercera Conferencia Mundial De Las Naciones Unidas Sobre La Reducción Del Riesgo De Desastres, más de 185 Estados han reforzado su compromiso de abordar la reducción del riesgo de desastres en el contexto del desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza, y de integrar como corresponda tanto la reducción del riesgo de desastres como el aumento de la resiliencia en las políticas, los planes, los programas y los presupuestos a todos los niveles.

Este compromiso se ha plasmado en el denominado Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2020-2030, en el cual se han acordado siete metas mundiales, entre las que destaca la meta “d” que invita a reducir considerablemente los daños causados por los desastres en las infraestructuras vitales y la interrupción de los servicios básicos.

Para lograr avanzar en las siete metas, se ha determinado en dicho compromiso que los Estados deben adoptar medidas específicas con respecto a las siguientes cuatro prioridades:

Prioridad 1: Comprender el riesgo de desastres.

Prioridad 2: Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo.

Prioridad 3: Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia.

Prioridad 4: Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción.

Para cumplir con el compromiso suscrito, Chile, al alero de la Plataforma Nacional para la Reducción de Riesgos de Desastres liderada por ONEMI, y en donde la Superintendencia de Servicios Sanitarios tiene un rol activo, ha construido la Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres 2020-2030, que tiene como objetivo el establecer las directrices para fortalecer la Gestión de Riesgo de Desastres, impulsadas y coordinadas desde el Estado de Chile, que consideren todo el ciclo de gestión del riesgo, fomentando una articulación sinérgica entre los diversos actores de la sociedad, en pos del desarrollo sostenible y el carácter resiliente de territorios y comunidades.

Esta Política cuenta con una arquitectura que se sustenta en cinco Ejes Prioritarios, en línea con lo establecido en el Marco de Sendai, a saber:

Eje 1: Comprender el Riesgo de Desastres

Eje 2: Fortalecer la Gobernanza de la Gestión del Riesgo de Desastres

Eje 3: Planificar e Invertir en la Reducción del Riesgo de Desastres para la Resiliencia

Eje 4: Proporcionar una Respuesta Eficiente y Eficaz

Eje 5: Fomentar una Recuperación Sostenible

En plena sintonía con lo anterior, y con el objetivo de fortalecer el marco regulador en materias asociadas a la Gestión Integral del Riesgo de Desastres en el Sector de Sanitario, la Superintendencia de Servicios Sanitarios ha liderado el proceso de co-construcción del denominado Plan Estratégico Nacional para la Reducción de Riesgo de Desastres en el Sector Sanitario 2020 -2030, que emerge como el documento guía que define la hoja de ruta que detalla en 42 acciones precisas las materias mínimas que deberán ser abordadas por el sector sanitario desde hoy y con miras al 2030 en materias relacionadas con la Gestión y Reducción del Riesgo de Desastres.

En particular, y dentro del Eje 3, que invita a planificar la reducción del riesgo de desastres en el sector sanitario, se han definido dos acciones, a saber, las acciones 3.2.1. y 3.2.2, tendientes a definir una Metodología de Análisis de Riesgos para Infraestructura Sanitaria.

En ese contexto, como primer impulso en el desarrollo de las acciones antes mencionadas, y en una colaboración estrecha entre la Superintendencia de Servicios Sanitarios y la Pontificia Universidad Católica de Chile, se ha desarrollado el estudio denominado “Metodología para la evaluación del riesgo en infraestructura de producción de agua potable frente a amenazas de origen natural”, el cual tiene por objetivo final el construir una [GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DESARROLLO DE UN ÍNDICE DE RIESGO DE AMENAZAS NATURALES QUE AFECTAN A LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE](#).

Esta guía así construida, contiene una propuesta metodológica para estimar la frecuencia de distintas amenazas de origen natural, definidas previamente, que eventualmente pueden afectar a la infraestructura de producción de agua potable, y en consecuencia, a la prestación normal de los servicios sanitarios. Del mismo modo, se realiza una propuesta metodológica para estimar las vulnerabilidades de los sistemas de producción frente a las amenazas de origen natural antes definidas, combinando todo en índices y matrices de riesgo que permitirá conocer el nivel de riesgo resultante para cada caso en estudio.

Finalmente, en su espíritu, esta guía no pretende más que ser un instrumento indicativo, de consulta libre y que sirva de apoyo principalmente para las concesionarias de servicios sanitarios urbanos, definidas desde un inicio como las beneficiarias principales del proyecto, fomentando con instrumentos como el aquí presentado, la incorporación cada vez más activa de la reducción del riesgo de desastres y el aumento de la resiliencia, en el centro de la toma de decisiones de las mismas concesionarias y del sector sanitario en general.

Sergio Barbera Pérez

**Jefe Unidad de Gestión de Riesgo de Desastres
Superintendencia de Servicios Sanitarios**



1. INTRODUCCIÓN

El presente documento comprende la **Guía metodológica para el Desarrollo de un Índice de Riesgo de amenazas naturales que afectan a los sistemas de producción de agua potable**. Forma parte del Proyecto CORFO 18BPE-93191 “Metodología para la evaluación del riesgo en infraestructura de producción de agua potable frente a amenazas de origen natural”. La infraestructura de producción de agua potable en Chile está expuesta a múltiples amenazas de origen natural como terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, inundaciones, deslizamientos de tierra, entre otras. Estas amenazas junto con la propia vulnerabilidad de la infraestructura dan origen a riesgos en la forma de interrupciones en el servicio de agua potable y/o en un deterioro de la calidad del servicio entregada a los consumidores.

Conscientes de la importancia de este tema en Chile, la norma chilena NCh691 relativa a la producción, conducción, almacenamiento y distribución de agua potable, establece en su numeral 5.3 que “Los sistemas de producción de agua potable, de acuerdo con sus características particulares, deben incorporar la evaluación de riesgos de cada uno de sus componentes...”. Sin embargo, a pesar de este reconocimiento normativo, hasta la fecha, no se han desarrollado en el país metodologías específicas que permitan evaluar el riesgo de la infraestructura de producción de agua potable frente a desastres de origen natural.

En los últimos años, luego del terremoto del Maule del 2010, y, particularmente con posterioridad a los eventos de turbidez extrema del 2013 en la cuenca del Maipo, se ha comenzado a tomar conciencia de la ocurrencia de estos eventos naturales y se ha hecho patente la necesidad de considerarlos en el diseño y funcionamiento de estos sistemas, particularmente de las plantas de producción de agua potable. Además, la afectación de la infraestructura de producción de agua potable por amenazas naturales supone importantes costos para las empresas sanitarias, las cuales durante la emergencia deben abastecer a la población mediante camiones aljibe, a la vez que implementan un proceso de recuperación de su infraestructura para alcanzar los niveles normales de servicio. Asimismo, hay un impacto económico negativo sobre las industrias, el comercio, los servicios y la población en general, quienes necesitan del suministro continuo de agua.



El presente documento tiene por objeto guiar al usuario de interés en la aplicación de la metodología propuesta, basada principalmente en un índice que permite evaluar el riesgo en sistemas de producción de agua potable frente a amenazas naturales. El documento se organiza por amenaza, detallando para cada una de ellas los datos necesarios y requerimientos para el cálculo de su índice de amenaza y de la vulnerabilidad del sistema de producción expuesto a cada una de ellas. De este modo, se muestran las metodologías para calcular el índice de amenaza y la vulnerabilidad operacional de las amenazas naturales consideradas en este estudio. Finalmente, con estos antecedentes es posible calcular un Índice de Riesgo (IR) y su cruce con la matriz de riesgo-exposición para conocer el nivel del riesgo al que se encuentra expuesto el sistema de producción analizado.

Previamente a comenzar con la descripción de cada una de las metodologías, es necesario remarcar el alcance y una serie de criterios generales seguidos en el desarrollo de la metodología de evaluación de riesgo de sistemas de producción de agua potable aquí propuesta. Se trata de una metodología de carácter determinístico que consta de dos fases: primero el cálculo de un índice de riesgo y posteriormente la aplicación de una matriz de riesgo. El criterio y objetivo principal seguido en la concepción de la metodología es la aplicabilidad de la metodología a escala nacional y en los diferentes tipos de sistemas sanitarios existentes en Chile, tanto en cuanto a tamaño como a nivel de complejidad.

Respecto a los alcances, como ya se ha mencionado, se consideran un máximo de seis amenazas naturales, siendo éstas sismos, tsunamis, inundaciones, aluviones, remociones en masa y turbidez. La consideración únicamente de éstas se debe a un estudio de los datos históricos de daños en sistemas de producción de agua potable en Chile. Dichas amenazas y sus consecuencias sobre los sistemas de producción de agua potable se detallan en los Reporte 1.1 "Metodología para la identificación de amenazas naturales que afectan a los sistemas de producción de agua potable" y Reporte 1.2 "Evaluación de los efectos de las amenazas naturales en sistemas de producción de agua potable", respectivamente. En cuanto a la vulnerabilidad, el estudio del riesgo se centra en la vulnerabilidad operacional de la infraestructura de producción de agua potable.

2. ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE AMENAZAS NATURALES

En primer lugar, se va a presentar la metodología propuesta para poder determinar el índice de amenaza asociado a la frecuencia con la que el territorio del caso de estudio (lugar donde se localiza la planta de producción de agua potable) puede verse potencialmente expuesto a cada amenaza analizada.

2.1 Amenaza Sísmica

Para evaluar la amenaza sísmica del lugar donde se emplaza el sistema de producción se debe recopilar la información de las fuentes sísmicas existentes y los eventos pasados para conocer la ley de recurrencia y la distribución de distancias que permitan hacer la evaluación probabilística de la amenaza (PSHA).

Adicionalmente se requiere la información de las condiciones geomecánicas del lugar para conocer la posible amplificación que se puede presentar en el sitio de la aceleración máxima de terreno. En este aspecto, también se deben evaluar condiciones específicas de deformación o pérdida de resistencia en suelos, como el fenómeno de licuación, que podrían requerir la evaluación de la respuesta sísmica de los elementos del sistema de producción en términos de deformaciones permanentes del suelo (PGD).

El análisis probabilístico de la amenaza sísmica debe considerar todos los posibles escenarios del sitio, y la variabilidad de la magnitud y la distancia a la fuente sísmica.

El modelo propuesto por Poulos et al. (2019) es una excelente herramienta para poder estimar la ley de recurrencia en el sitio si no se tienen suficientes registros para obtener una evaluación específica. Para la estimación de la aceleración máxima del terreno (PGA, peak ground acceleration), existen diversas ecuaciones de predicción de movimiento de suelo (GMPE) específicas para Chile como la propuesta por Idini et al. (2017) o Montalva et al. (2017). Los pasos a seguir para obtener la curva de amenaza, que expresará la aceleración máxima de terreno con su correspondiente tasa de excedencia anual, son los enumerados a continuación, y esta metodología puede encontrarse en diversas fuentes (e.g., Cornell 1968):

1. Identificación de todas las fuentes sísmicas capaces de producir movimientos de suelo dañinos.
2. Caracterización de la distribución de magnitudes de los sismos (las tasas a las que se espera que ocurran los sismos de varias magnitudes).
3. Caracterización de la distribución de distancias fuente-a-sitio asociadas con los sismos potenciales.
4. Predicción de la distribución resultante de la medida de intensidad del movimiento de suelo como una función de la magnitud, la distancia, las características de la fuente sísmica y las propiedades geomecánicas del suelo.
5. Combinación de las incertidumbres en el tamaño del sismo, la ubicación y la intensidad, usando el teorema de probabilidad total.

La curva tendrá la forma que se muestra en la Figura 1. Esta curva permitirá conocer el PGA que se requiere para el diseño dado una tasa de excedencia anual, que también representa la probabilidad de ocurrencia de un evento que genere esa medida de intensidad. El inverso de la tasa de excedencia anual es el período de retorno y es ese valor el que puede relacionarse con el Índice de frecuencia de amenaza (en adelante, índice de amenaza), como se muestra en la columna de descripción en la Tabla 1.

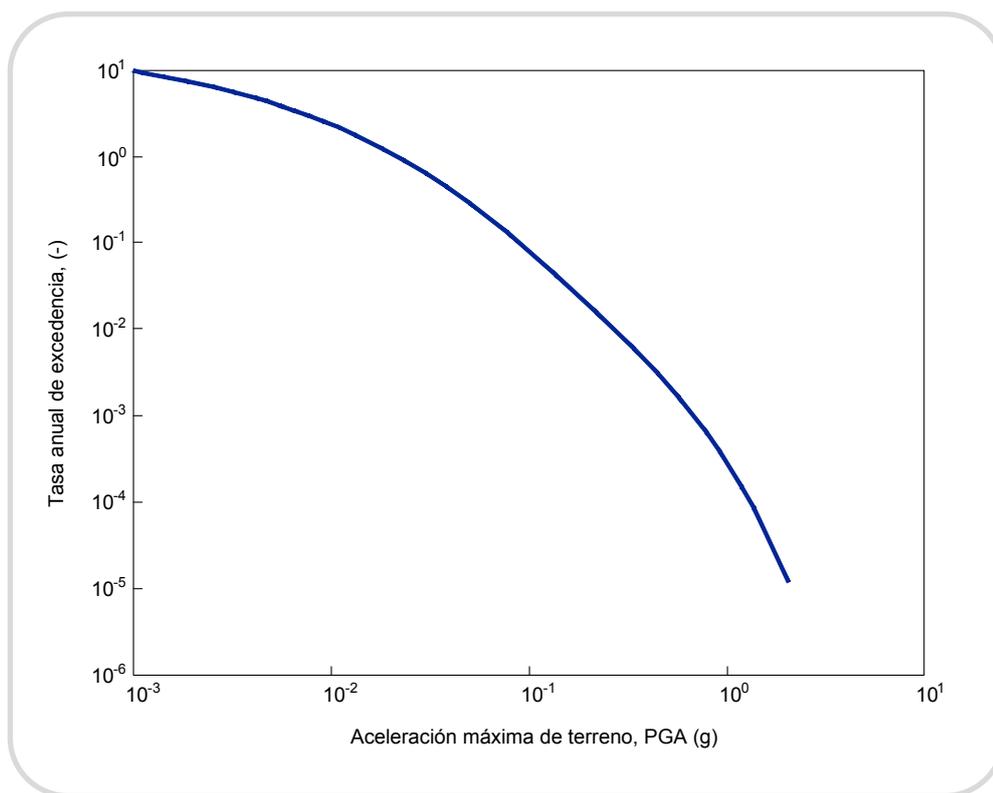


Figura 1. Curva de amenaza sísmica.

Tabla 1. Índice de amenaza.

Índice de amenaza, IA	Categoría de frecuencia de ocurrencia	Descripción
0,01 < IA ≤ 0,1	Muy baja	El fenómeno o amenaza no es frecuente. Es inusual en el área de influencia y tiene un período de retorno mayor a 2000 años.
0,1 < IA ≤ 0,4	Baja	El fenómeno o amenaza tiene baja frecuencia. Su período de retorno es mayor a 500 años y menor a 2000 años.
0,4 < IA ≤ 0,7	Media	El fenómeno o amenaza es recurrente y su período de retorno varía entre 100 a 500 años.
0,7 < IA ≤ 1,0	Alta	El fenómeno es altamente repetitivo. Tiene un período de retorno que va de 1 a 100 años.

2.2 Amenaza de Tsunami

La amenaza de tsunami está condicionada por las características tectónicas (sismos tsunamigénicos), condiciones del terreno y/o fondo marino (deslizamientos submarinos y subaéreos), y aún menos frecuentes por meteoritos que puedan afectar un cuerpo de agua (océanos y lagos). En esta metodología se consideran únicamente las condiciones tectónicas que existen en cada zona según Poulos et al. (2019), de manera que la generación de tsunamis a tener en cuenta es sólo aquella asociada a terremotos de subducción. En Chile, la sismicidad está definida por el proceso de subducción que se produce entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, y de ésta con la placa Antártica. En la parte del sur, la interacción de la placa Scotia, Sudamericana y Antártica. Sin embargo, un trabajo completo de amenaza de tsunamis ha de contemplar la caracterización de los fenómenos que pueden originar un tsunami como consecuencia de un desplazamiento o impacto en un cuerpo de agua.

El siguiente esquema (Figura 2) muestra el proceso de tsunamis y las incertidumbres asociadas en el caso de un modelo confiable de evaluación probabilística de la amenaza de tsunamis (PTHA, por sus siglas en inglés), un pronóstico que incorpora un espectro de incertidumbres epistémicas y aleatorias.

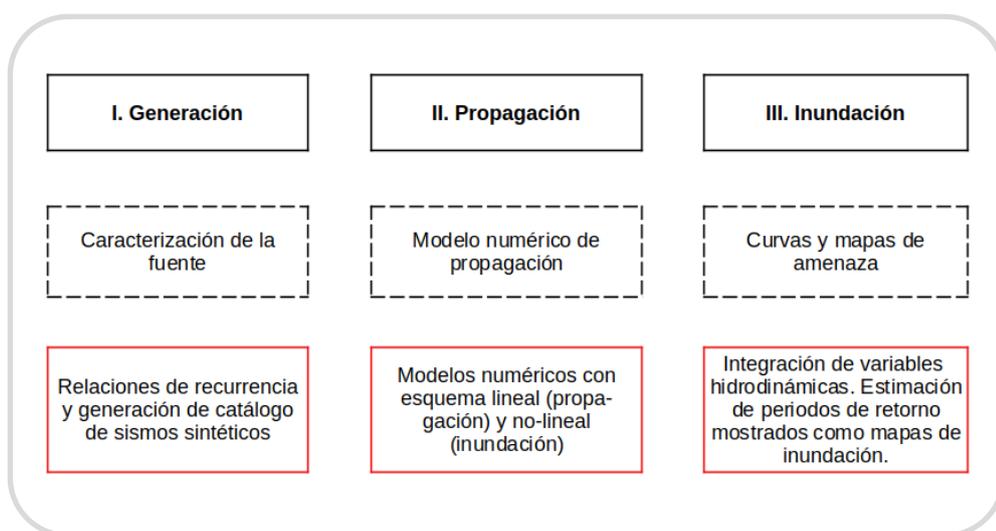


Figura 2. Esquema que muestra los tres pasos del estudio del modelado numérico del potencial de tsunamis, que integra desde la generación de tsunami y los resultados asociados a la amenaza.

A continuación, se resumen las propuestas de acuerdo con los niveles de complejidad de la estimación de la amenaza de tsunamis, teniendo en consideración la disponibilidad de datos. En este estudio se proponen tres enfoques relacionados con los niveles de detalle necesarios en estudios de amenaza de tsunamis (EAT). El primero, basado en la información disponible el método determinista híbrido (EAT-N0), que utiliza información disponibles en las cartas de inundación por tsunamis (CITSU) generadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). El segundo, llamado el método empírico (EAT-N1) que no considera la simulación numérica de la inundación, sin embargo, utiliza una aproximación analítica para determinar el run-up (valor de la altura de ola en el límite de la extensión horizontal máxima) y, por otro lado, el valor de alturas de ola medidas en algún punto en tierra. El tercer nivel de la metodología propuesta es el método computacional o numérico dividido en dos niveles de detalle y/o complejidad, el método híbrido (EAT-N3) y, el método probabilístico integral (EAT-N4) en el que se considera la inundación numérica de tsunamis lo que requiere de un mayor tiempo computacional y la necesidad de datos topo-batimétricos de gran detalle. Por lo anterior, este nivel se ha aplicado especialmente en estudios de escala local.

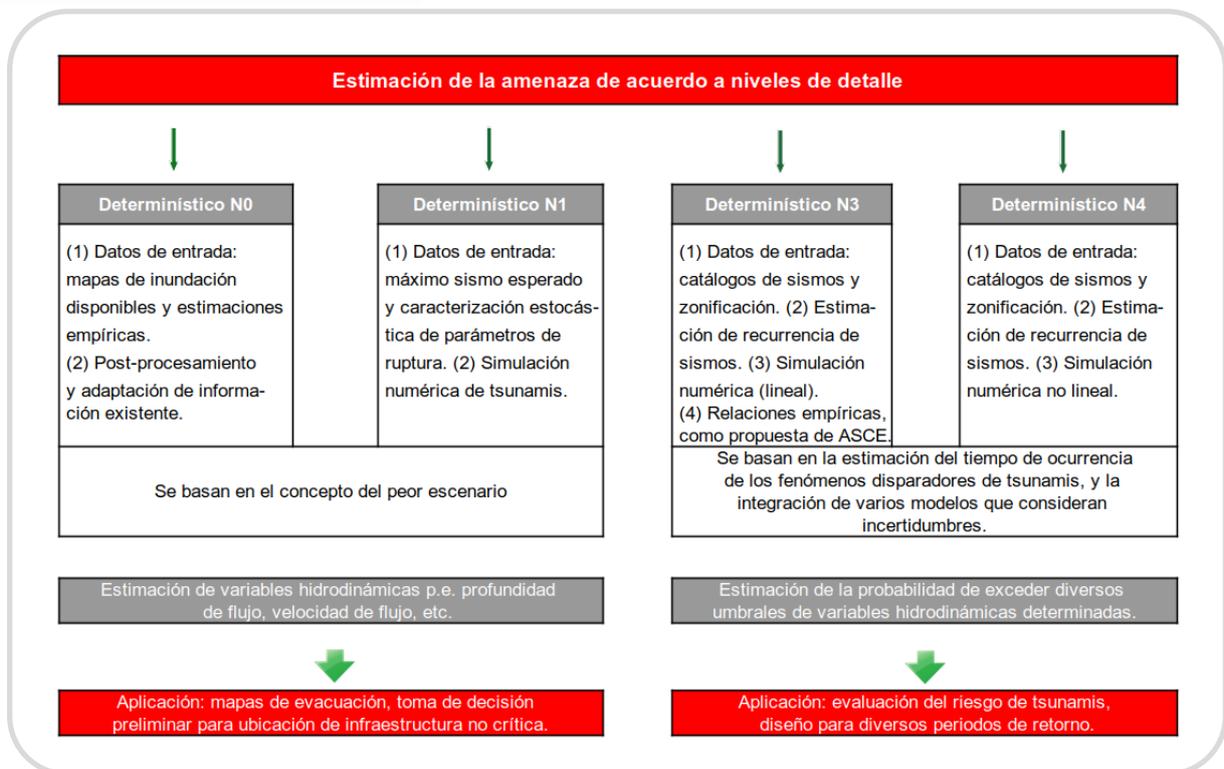


Figura 3. Esquema que muestra los niveles en que se ha dividido esta propuesta metodológica.

En resumen, para llegar a un modelo confiable de evaluación probabilística de la amenaza de tsunamis (PTHA) se debe incorporar incertidumbres en cada uno de los procesos mostrados en la Figura 3. Estas incertidumbres son los parámetros sísmicos y los modelos de recurrencia de los fenómenos que disparan tsunamis. La caracterización de la ruptura donde se incorpore la ruptura cinemática, distribución del deslizamiento, para lo que se han usado técnicas estocásticas (e.g., Crempien et al. 2020). Además, para generar mapas de inundación se debe contar con modelos topo-batimétricos de alta resolución. En esta guía se han ido proponiendo esos diferentes niveles de complejidad como se muestra en la Figura 3. Sin embargo, los pasos que se muestran a continuación describen la adaptación de esos métodos al presente proyecto de evaluación del riesgo en sistemas de producción de agua potable.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el peligro de tsunami está conectado en esta metodología con la amenaza sísmica en la fase de caracterización de la recurrencia, posteriormente se utilizan técnicas estocásticas para la variabilidad del deslizamiento. Esta información se usa para obtener la condición inicial para el modelo de propagación de tsunamis. De manera esquemática, las fases a seguir para caracterizar la amenaza de tsunami se resumen en el siguiente esquema (Figura 4).

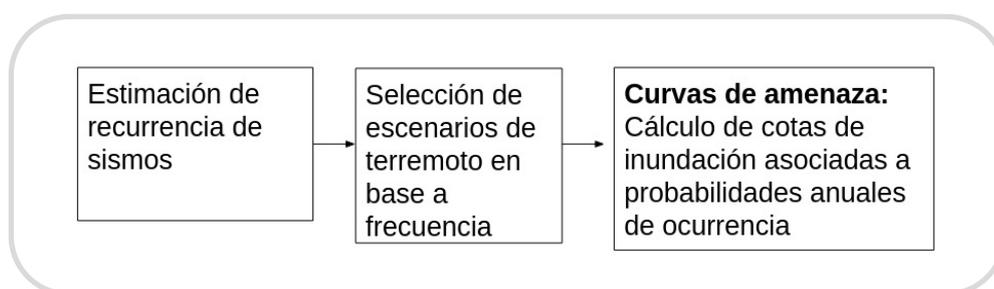


Figura 4. Esquema general de la estimación de amenaza de tsunami.

La probabilidad de ocurrencia de un tsunami destructivo es más baja que aquella asociada a las otras amenazas consideradas en esta metodología de riesgo, por lo que, para poder integrar todas las amenazas en la misma metodología, se define en el caso de los tsunamis, eventos generados por terremotos de periodos de retorno cercanos a 100 y 500 años como se muestra en el panel 4 (Figura 5).



La metodología propuesta sigue la filosofía establecida en Japón luego del terremoto y tsunami de 2011, en donde para la evaluación del funcionamiento de obras de infraestructura y planificación urbana se definen dos niveles de inundación de tsunamis de acuerdo con su probabilidad de ocurrencia (asociada a la recurrencia sísmica), uno con periodo de retorno del orden de 100 años, y otro con periodos de retorno entre algunos cientos de años y 1.000 años (Muhari et al. 2015). Sin embargo, en un diseño se debe tener en cuenta el alcance del proyecto, su vida útil y si es, por ejemplo, una infraestructura crítica. Esto lleva a diseñar para los periodos de retorno correspondientes, eligiendo el nivel adecuado de complejidad según lo descrito en Figura 3.

Por otro lado, en la Figura 5 se resumen los pasos requeridos para la caracterización de la amenaza por tsunami, en este caso de dos niveles:

1. Evaluar la recurrencia de sismos. Esta información se utiliza para generar un catálogo sintético de escenarios.
2. A partir de los escenarios sísmicos definidos, se utiliza un modelo numérico para simular los tsunamis.
3. Se integran los resultados de las simulaciones numéricas en puntos de interés o cota de inundación correspondiente a la obra en estudio (curva de amenaza).
4. Se determinan las variables de tsunamis (e.g., altura o profundidad de inundación, h_i) para distintas probabilidades de excedencia anual (P_i).
5. Finalmente, se utilizan dos niveles (índices de amenaza) para caracterizar la amenaza de tsunami en este trabajo.

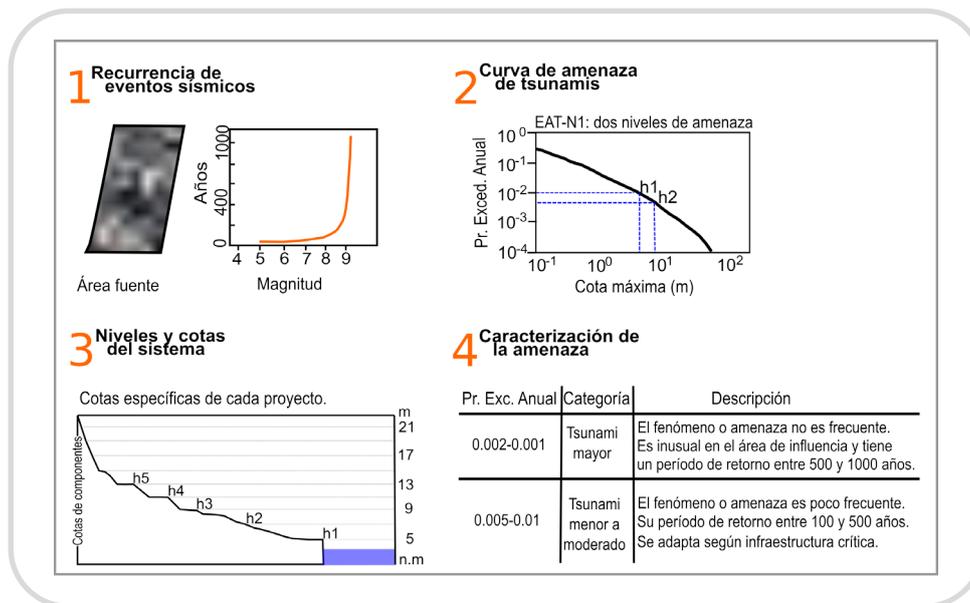


Figura 5. Fases para la estimación de la probabilidad de ocurrencia y curvas de amenaza de sismos y tsunamis.

Para los eventos con periodos de recurrencia media entre cientos de años y 1.000 años, es posible utilizar la información de las cartas de inundación del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (cartas CITSU) que representan una estimación del peor escenario conocido para la zona en cuestión. Sin embargo, las cartas CITSU no necesariamente tienen un periodo de retorno asociado y han sido confeccionadas para otros fines; es por ello que sólo debieran considerarse para un primer acercamiento a la evaluación de la amenaza de tsunami. Para generar otros eventos sísmicos (sintéticos), se asocia la recurrencia de eventos sísmicos estimada por la distribución de Gutenberg-Richter propuesta por Poulos et al. (2019). Aplicando este último enfoque es posible definir un rango de magnitudes de sismos cuyos escenarios se integran en la curva de amenaza (panel 2, Figura 4). Estos escenarios son la base para la simulación numérica de tsunamis, cuyos resultados se integran en la curva de amenaza (Figura 5). La curva de amenaza de tsunamis muestra las probabilidades de excedencia anual (P) y los diferentes niveles de inundación (h_i). El panel 3 (Figura 5) es esquemático, y muestra los diversos niveles (cotas) que se pueden obtener.

El índice de amenaza para el caso de tsunamis va a estar dado según la recurrencia de los distintos tipos de evento definidos anteriormente en función de su periodo de retorno (mayor y menor), tal y como se muestra en la Tabla 2. El índice de amenaza se define según lo estipulado en la Tabla 1 asumiendo para este caso, el valor de los rangos descritos que corresponde al mínimo en el rango de periodos de retorno.

Tabla 2. Ejemplo de probabilidades de excedencia para distintos eventos de tsunami.

Cota	Probabilidad excedencia anual (P)	Periodo de retorno (años)	Índice de amenaza	Categoría de frecuencia de ocurrencia
Evento menor	0,01	100	$0,4 < IA \leq 0,7$	Media
Evento mayor	0,002	500	$0,1 < IA \leq 0,4$	Baja

2.3 Amenaza de Inundación Fluvial

Para estimar la frecuencia de ocurrencia anual (P_i) de una inundación de magnitud (h_i) se sigue la metodología de la FEMA (2020), la cual consiste en los siguientes pasos:

1. Se realiza un estudio hidrológico para determinar caudales asociados a crecidas de diferentes periodos de retorno.
2. A partir de los caudales definidos, se utiliza un modelo hidráulico para encontrar la cota de inundación correspondiente a cada crecida.
3. Con esto, se determinan las alturas de agua (h_i) para distintas probabilidades de excedencia anual (P_i).

El último paso es transformar las probabilidades de excedencia anual a periodo de retorno ($Tr = 1/Pr$) y con este, definir el "índice de amenaza" según la Tabla 1 (misma tabla que la amenaza sísmica). Como el índice de amenaza está presentado como rango, el valor escogido dentro del rango se calcula a partir del periodo de retorno a través de una interpolación lineal. Por ejemplo, en el nivel Alto de la Tabla 1, que corresponde a periodos de retorno entre 1 y 100 años y en donde $0,7 < P \leq 1,0$; los eventos con periodo de retorno iguales a 100 año tienen un valor de 0,7 y los eventos con periodos de retorno igual a 1 o más frecuentes tienen un valor igual a 1,0. Los valores intermedios se interpolan linealmente. En la Figura 6 y Tabla 3 se muestra a modo de ejemplo una planta con distintos niveles de inundación según su probabilidad de ocurrencia.

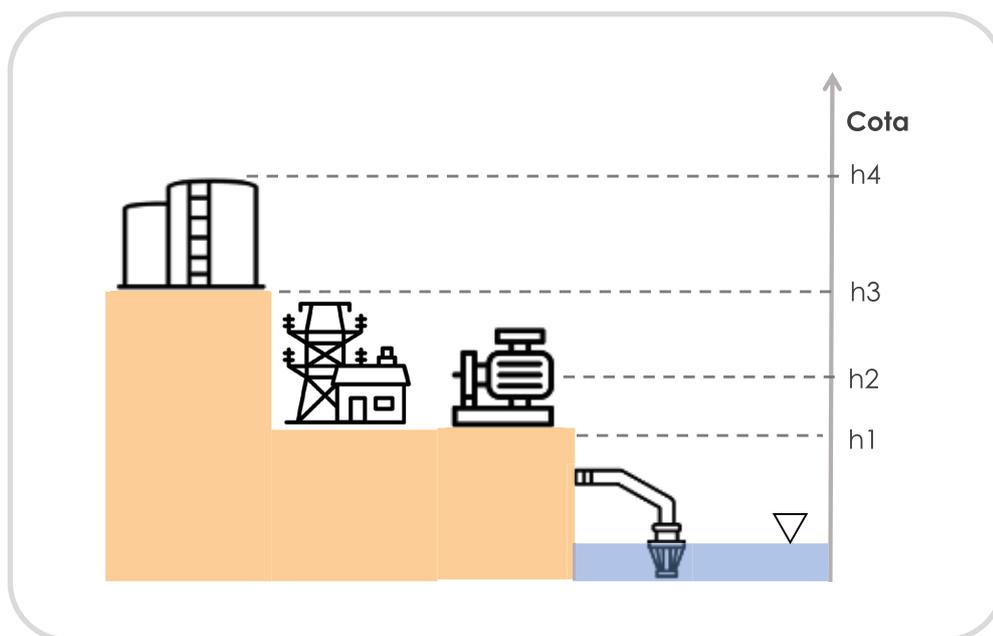


Figura 6. Representación esquemática de una planta de agua potable con distintos niveles de inundación.

Tabla 3. Ejemplo de probabilidades de excedencia para distintos eventos de inundación fluvial.

Cota	P. exc. anual (P)	Periodo de retorno (años)	Índice de amenaza	Índice de amenaza interpolado	Categoría de frecuencia de ocurrencia
h1	0,50	2	$0,7 < IA \leq 1,0$	0,997	Alta
h2	0,10	10	$0,7 < IA \leq 1,0$	0,973	Alta
h3	0,05	20	$0,7 < IA \leq 1,0$	0,943	Alta
h4	0,01	100	$0,4 < IA \leq 0,7$	0,700	Media

2.4 Amenaza de Aluvión

La frecuencia de ocurrencia de un aluvión se define de la misma manera que para la amenaza de inundación, con la diferencia de que en este caso es mucho más difícil discretizar la magnitud de los eventos en distintas cotas, por lo cual se opta por un análisis de máximo dos niveles, es decir, un evento mayor y un evento menor (Figura 5).

Los pasos a seguir para determinar la probabilidad de ocurrencia de cada tipo de eventos son los siguientes:

1. A partir del registro histórico del lugar, se categorizan los eventos aluvionales ocurridos en dos tipos, eventos menores y eventos mayores, según su magnitud y probabilidad de ocurrencia. Si no es posible hacer esta distinción, sólo se caracteriza un tipo de evento.
2. Utilizando métodos empíricos (evidencia de eventos pasados) o modelación numérica, se estima el tipo de impacto causado por un evento menor y un evento mayor, además de la cota y área afectada.
3. Con esto, se construye un mapa con la zona del sistema de producción de agua potable afectado por un evento menor y un evento mayor y la probabilidad de ocurrencia anual de cada tipo de evento.

En la Figura 7 y Tabla 3 se muestra a modo de ejemplo una planta de producción de agua potable con distintos niveles de aluviones según su probabilidad de ocurrencia. Finalmente, se deben convertir las probabilidades de excedencia anual a periodo de retorno ($Tr = 1/Pr$) y con este, definir el "índice de amenaza" según la Tabla 1, interpolando dentro del rango de índice de frecuencia definido según el periodo de retorno.

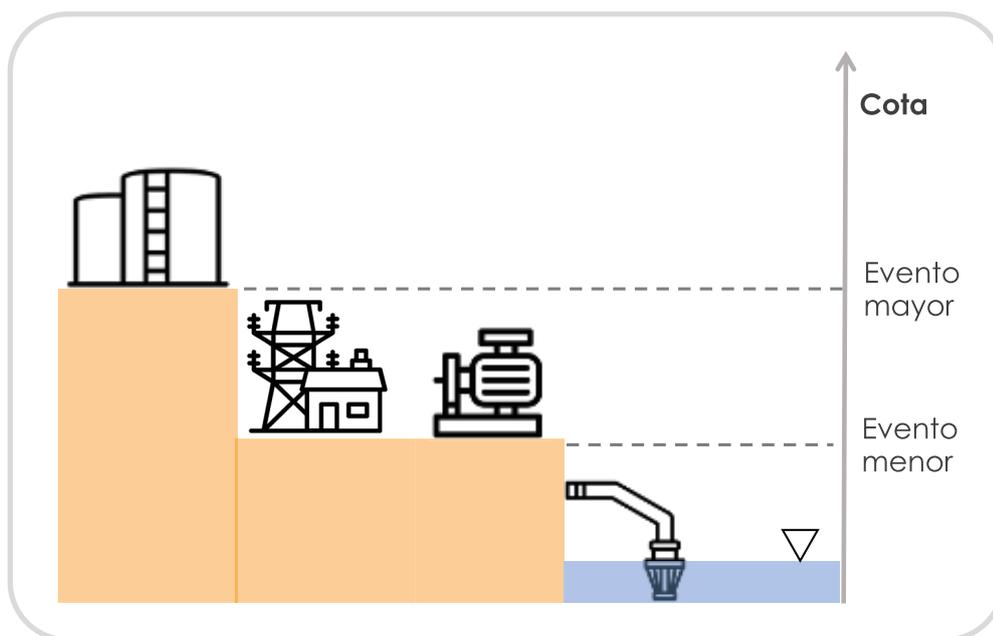


Figura 7. Representación esquemática de una planta de agua potable con distintos niveles de eventos aluvionales.

Tabla 4. Ejemplo de probabilidades de excedencia para distintos eventos de aluvión.

Cota	P. exc. anual (P)	Periodo de retorno (años)	Índice de amenaza	Categoría de frecuencia de ocurrencia	Índice de amenaza interpolado
Evento menor	0,05	20	$0,7 < IA \leq 1,0$	Alta	0,997
Evento mayor	0,01	100	$0,4 < IA \leq 0,7$	Media	0,973

2.5 Amenaza de Remoción en Masa

La amenaza de remoción en masa se refiere a un fenómeno que afecta directamente al sistema de producción de agua potable en su lugar de emplazamiento. Efectos indirectos como aluviones y turbidez del agua cruda se tratan de manera separada en el documento.

La frecuencia de ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa se designa a través del concepto de susceptibilidad, la cual es la propensión o tendencia de una zona a ser afectada por movimientos de ladera por desestabilización. Para estimar la susceptibilidad se considera un método mixto, el cual puede ser:

- Empírico: basado en registro histórico, bajo la idea de que áreas afectadas por eventos pasados tienen mayor probabilidad de experimentar eventos futuros.
- Heurístico: Basado en evaluación multicriterio de factores (e.g., pendiente, curvatura, distancia a drenaje) según criterio experto.

Estos métodos se explican de manera detallada en el Reporte 1.1 "Metodología para la identificación de amenazas naturales que afectan a los sistemas de producción de agua potable" del presente estudio. A partir de la evaluación de susceptibilidad, se designan las probabilidades de ocurrencia definidas en la Tabla 5, a partir de lo cual es posible definir el índice de amenaza.

Tabla 5. Índice de amenaza para la amenaza de remoción en masa.

Índice de amenaza	Categoría de frecuencia de ocurrencia	Descripción
$0,01 < IA \leq 0,1$	Muy baja	Las obras se encuentran en un lugar plano. No hay laderas que puedan desencadenar una remoción. No hay evidencia de remociones pasadas.
$0,1 < IA \leq 0,4$	Baja	Existen remociones en masa históricas cercanas al lugar según catastro SERNAGEOMIN, pero las obras no están ubicadas en un lugar susceptible o al pie de una ladera susceptible. -o- No existen remociones en masa históricas cercanas al lugar según catastro SERNAGEOMIN, pero las obras están ubicadas en un lugar susceptible o al pie de una ladera susceptible.
$0,4 < IA \leq 0,7$	Media	Existen remociones en masa históricas cercanas al lugar según catastro SERNAGEOMIN y las obras están ubicadas en una zona susceptible o al pie de una ladera susceptible.
$0,7 < IA \leq 1,0$	Alta	Se observan remociones en masa pasadas en laderas aledañas al sitio de estudio o en el lugar mismo de emplazamiento. Las obras están ubicadas en un lugar susceptible o al pie de una ladera susceptible.

2.6 Amenaza de Turbidez

Para evaluar adecuadamente la amenaza de turbidez se debe contar con los registros históricos del parámetro de turbidez medido aguas arriba del punto de captación de agua cruda. Los valores de turbidez deben ser idealmente horarios. Respecto a las características del sistema de producción de agua potable, es necesario conocer su valor de turbidez de diseño. Tanto los registros históricos como el valor de diseño deben ser expresados en NTU (Unidad Nefelométrica de Turbidez).

Para fines de la aplicación de esta metodología se define un evento de turbidez o registro válido como aquellos que en promedio posean un valor de NTU mayor al de diseño durante un periodo de al menos 6 horas. Por tanto, se deben seguir los siguientes pasos, a partir de los registros:

1. Identificar los valores de turbidez que sobrepasan el valor de NTU de diseño del sistema de producción.
2. Estimar la duración en donde en promedio se superó el valor de diseño y determinar si es considerado como un evento de turbidez (duración mayor a 6 horas).
3. Determinar el número de eventos de turbidez (registros válidos) y su frecuencia para el total de registros.

Una vez identificado el número de eventos y su frecuencia, se procede a asignar el valor de índice de amenaza, para lo cual se debe utilizar el valor más adecuado de acuerdo con la columna de descripción de la Tabla 6. Para el caso de un sistema de producción que no posea registros de NTU cercanos al punto de captación, se recomienda asumir una mirada conservadora y optar por el rango de amenaza "Alta".

Tabla 6. Escala semántica para índice de amenaza de turbidez.

Índice de amenaza	Categoría de frecuencia de ocurrencia	Descripción
$0,01 < IA \leq 0,1$	Muy baja	No se han presentado eventos de turbidez que superen el NTU de diseño del sistema de producción durante los últimos 20 años.
$0,1 < IA \leq 0,4$	Baja	No se han presentado eventos de turbidez que superen el NTU de diseño del sistema de producción durante los últimos 10 años.
$0,4 < IA \leq 0,7$	Media	Se han presentado eventos de turbidez que superan el NTU de diseño del sistema de producción durante los últimos 10 años con una frecuencia menor o igual a 3 eventos en el periodo.
$0,7 < IA \leq 1,0$	Alta	Se han presentado eventos de turbidez que superan el NTU de diseño del sistema de producción durante los últimos 10 años con una frecuencia mayor a 3 eventos en el periodo. o No se cuenta con registros de NTU cercanos al punto de captación del sistema de producción.

Para asignar los valores del índice de amenaza entre los rangos reportados por categoría se recomiendan las siguientes consideraciones:

- **Muy baja:** Considerando el periodo previo a los últimos 20 años (periodo A en Figura 8), se recomienda asignar un valor de 0,01 si no existen eventos de turbidez (registros válidos), y un valor de 0,1 si para dicho periodo existe al menos 1 evento.
- **Baja:** Considerando el periodo anterior a los últimos 10 años, pero posterior al año 20 previo a la actualidad (periodo B en Figura 8), se recomienda asignar un valor de 0,2 si existe 1 evento de turbidez; un valor de 0,3 si existen 2 eventos de turbidez; y un valor de 0,4 si existen 3 o más eventos.

- **Media:** Considerando el periodo correspondiente a los últimos 10 años (periodo C en Figura 8), se recomienda asignar un valor de 0,5 si existe 1 evento de turbidez; un valor de 0,6 si existen 2 eventos de turbidez; y un valor de 0,7 si existen 3 eventos de turbidez.
- **Alta:** Considerando el periodo correspondiente a los últimos 10 años, se recomienda asignar un valor de 0,8 si existen 4 eventos de turbidez; un valor de 0,9 si existen 6 eventos de turbidez; y un valor de 1 si existen 8 o más eventos. Para cantidades intermedios se recomienda interpolar linealmente entre los límites respectivos.

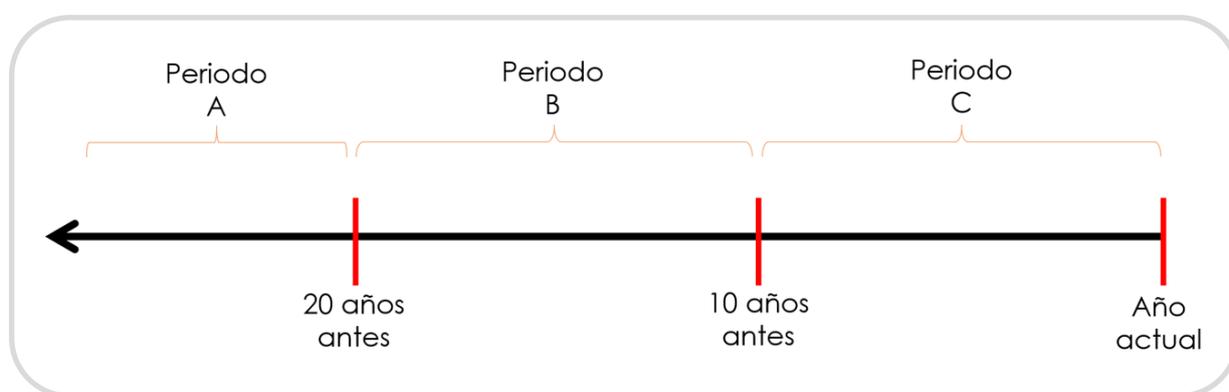


Figura 8. Periodos a considerar para índice de amenaza turbidez.

Además de lo anterior, como recomendación general, si solo se tienen registros para un periodo de tiempo menor a 10 años, se tendrá que considerar según corresponda las categorías baja, media y alta.

3. ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD OPERACIONAL

A continuación, se describe por amenaza los pasos a seguir que son necesarios para poder estimar la vulnerabilidad operacional que presenta el sistema de producción de agua potable a analizar frente a cada una de las amenazas presentes en el territorio del caso.

3.1 Vulnerabilidad ante Amenaza Sísmica

La vulnerabilidad sísmica de un sistema complejo como un sistema de producción de agua puede estimarse a partir del uso de curvas de fragilidad. Para esta propuesta, las curvas de fragilidad están en términos de PGA, en Chile el decreto supremo No 172/1996 Norma Técnica NCh 433 de Diseño Sísmico de Edificios, propone una zonificación del territorio chileno como se muestra en la Figura 9 y para cada zona establece un PGA (Tabla 7).

Tabla 7. Aceleración máxima de terreno base, PGA_{BASE} (NCh 433).

Zona Chile	Aceleración efectiva base (g)
1	0,20
2	0,30
3	0,40



Figura 9. Zonificación sísmica de Chile (NCh 433).

Una vez conocido el valor de la aceleración máxima de terreno base, PGA_{BASE} , se debe conocer la amplificación, S , que puede existir debido a las características del terreno (Tabla 8) para conocer el PGA que actúa directamente sobre el elemento, empleando la siguiente relación:

$$PGA = S \cdot PGA_{BASE} \tag{1}$$

Tabla 8. Factor de amplificación, S (NCh 433).

Tipo de suelo	Factor de amplificación, S
I Roca	0,90
II Grava, arena densa, suelo cohesivo duro	1,00
III Grava, arena, suelo cohesivo	1,20
IV Suelo cohesivo saturado	1,30

Es importante recalcar que estos valores de PGA son los mínimos que deben usarse para el diseño según la norma NCh 433. Dependiendo de la importancia de la estructura, los valores límite pueden ser mayores según el reglamento que regule las condiciones de construcción.

Por otro lado, un análisis probabilístico de amenaza sísmica realizado para un sitio específico con amplia exploración y un extenso catálogo sísmico puede arrojar resultados mayores que deben ser tomados en consideración.

Las curvas de fragilidad deben estimarse para las condiciones específicas del sitio, de sismicidad y características de las estructuras. Sin embargo, para esta guía se recomienda utilizar estas curvas que han sido desarrolladas por diversos investigadores (Pitilakis et al. 2014). Los valores se muestran en la Tabla 9 y están dados para los valores límite que pueden tenerse debido a la zonificación (variando desde 0.18 a 0.52 g). Una vez que se define el valor de PGA, éste debe ser redondeado al valor inmediato superior de los rangos que se muestran en la Tabla 7, y a partir de ahí obtener la probabilidad de falla de cada elemento. Estos valores pueden ser modificados si existe un estudio adicional de curvas de fragilidad. Se observa aquí que las tuberías existentes en la planta de producción de agua potable no están dadas en la tabla. La razón es que conocer la falla en una tubería no refleja directamente el daño que puede tener el sistema o el impacto en el nivel de desempeño. Las tuberías son los elementos que pueden presentar más daño en un sistema de agua, pero deben revisarse en un contexto del funcionamiento de la red de tuberías. Para metodologías y curvas de fragilidad que pueden usarse para el análisis de tuberías se recomienda emplear las ecuaciones propuestas por la ALA (2001) en un estudio que incluye casos de Estados Unidos, Japón, México, Chin; Pitilakis et al. (2014) que considera casos europeos; o Castro et al. (2020) que muestra una evaluación de riesgo sísmico para un sistema de distribución de agua potable en Chile.

Tabla 9. Probabilidad de daño (Creación propia con base en Pitilakis et al. 2014).

	Probabilidad de daño		
	PGA=0.18	PGA=0.35	PGA=0.52
Pozos con anclaje	0,60	0,88	0,95
Pozos sin anclaje	0,18	0,5	0,73
Sistema de producción de agua potable	0,05	0,8	1
Sistema pequeño	0,2	0,8	0,98
Sistema pequeño con anclaje	0,07	0,48	0,52
Sistema mediano	0,05	0,53	0,88
Sistema mediano con anclaje	0,01	0,18	0,52
Sistema grande	0,05	0,53	0,89
Sistema grande con anclaje	0	0,13	0,36
Estaciones de bombeo	0,6	0,95	1
Estaciones de bombeo pequeñas	0,2	0,71	0,9
Estaciones de bombeo pequeñas con anclaje	0,25	0,51	0,72
Estaciones de bombeo medianas a grandes	0,21	0,78	0,92
Estaciones de bombeo medianas a grandes con anclaje	0,17	0,52	0,73
Tanques de almacenamiento	0,03	0,33	0,68
Tanque de almacenamiento semi-enterrado	0,2	0,52	0,7
Tanques de almacenamiento de acero superficial	0,02	0,22	0,45

Empleando el valor de probabilidad de falla se entra a la Tabla 10 para encontrar el rango de vulnerabilidad al que pertenece el elemento.

Tabla 10. Vulnerabilidad física.

Vulnerabilidad física ($V_{física}$)	Categorización	Nivel de probabilidad de daño
1	Muy baja	La probabilidad de falla es la más baja o es nula (0-10%)
2	Baja	La probabilidad de falla debido al sismo es baja (11-20%)
3	Media	Es probable que la componente falle debido al sismo (21-50%)
4	Alta	La probabilidad de falla debido al sismo es alta (51-70%)
5	Muy Alta	La componente está en peligro de colapsar o falla (71-100%)

La vulnerabilidad operacional depende de la medida de desempeño del sistema de producción de agua potable que puede ser caudal producido, caudal entregado, presión o calidad del agua. Para ello se define primero el nivel de impacto de cada elemento dependiendo de su redundancia o la reducción que causa el daño de dicho elemento de esta medida de desempeño (Tabla 9). Este paso requiere que se conozca bien el proceso operativo del sistema de producción de agua, se tenga experiencia con el proceso, fallas previas en ese o sistemas similares, y se tenga información con respecto a medidas de mitigación (elementos redundantes) que entren en funcionamiento si existe algún problema.

Tabla 11. Nivel de impacto.

Índice	Categorización	Nivel de impacto, I
1	Bajo	Reduce una de las capacidades del sistema (presión, caudal, calidad) o el elemento tiene redundancia.
2	Medio	Reduce dos o más de las capacidades del sistema (presión, caudal, calidad)
3	Alto	Elimina una de las capacidades del sistema (presión, caudal, calidad)
4	Esencial	No se puede llevar a cabo el proceso

Conocido el nivel de impacto, la vulnerabilidad operacional se estima como:

$$V_o = V \times I \tag{2}$$

La Tabla 12 permite estimar la vulnerabilidad operacional que debe emplearse para el cálculo del índice riesgo de acuerdo con la ecuación (4).

Tabla 12. Vulnerabilidad operacional ante amenaza sísmica.

Índice VEN (V_i)	Categorización	Nivel de vulnerabilidad
1	Muy baja	V_i de todas las componentes está debajo de 2
2	Baja	V_i de todas las componentes está debajo de 6
3	Media	V_i la mayoría de las componentes está entre 2 y 6. V_o de una o dos componentes es mayor a 6 pero menor a 15
4	Alta	V_i de al menos dos componentes está entre 6 y 14, y V_o de una componente está entre 15 y 20
5	Muy alta	V_i de al menos dos componentes está entre 15 y 20. **Se interrumpe el suministro eléctrico y no hay un generador de energía alternativo en el sistema de producción

3.2 Vulnerabilidad ante Amenaza de Tsunami

La vulnerabilidad para la amenaza de tsunami se calcula de la misma manera que en el caso de la inundación, el cual se presenta a continuación. Para ello se emplean los valores de la Tabla 13. Para el cálculo de la vulnerabilidad esperada (V_e) de la ecuación (3), se consideran dos niveles de amenaza (evento menor y evento mayor) y se determina el índice de amenaza de cada evento (I_A) y la vulnerabilidad (V_i) frente a cada magnitud.

Según el alcance de otros proyectos, se pueden generar curvas de fragilidad específicas de la zona. Sin embargo, para esta guía se ha considerado solo un valor binario debido a los efectos que los tsunamis pueden generar en la infraestructura crítica.

3.3 Vulnerabilidad ante Amenaza de Inundación Fluvial

La vulnerabilidad de sistemas de producción de agua potable ante amenaza de inundación se define a partir de un índice de vulnerabilidad, en el cual se asigna un valor de 1 a 5 según el impacto que un evento hasta la altura h_i tenga en el sistema de agua potable en términos de producción y distribución.

Para estos efectos, se entiende por producción el conjunto de sistemas y operaciones que permiten producir agua potable, y por distribución el agua potable que es capaz de entregar el sistema hacia la red. Así, por ejemplo, si una planta de agua potable presenta daños en sus sistemas de tratamiento, pero cuenta con estanques de reserva que le permiten seguir entregando agua potable a la red durante un tiempo, se considera que este evento afecta sólo la producción, pero no la distribución.

A partir de estas consideraciones, se definen los cinco niveles de vulnerabilidad operacional presentados en la Tabla 13.

Para determinar en qué nivel de vulnerabilidad se encuentra el sistema de producción de agua potable frente un determinado evento, se propone usar el árbol de decisión mostrado en la Figura 10, el cual ayuda definir el nivel de vulnerabilidad según las características propias del sistema. Debido a que cada sistema de producción de agua potable es distinta y susceptible a sufrir distintos tipos de impacto para una misma amenaza, es posible que el árbol de decisión presentado no pueda ser aplicado directamente, frente a lo cual prevalecen los criterios establecidos en la Tabla 11.

Tabla 13. Índice de vulnerabilidad operacional para la amenaza de inundación.

Índice VEN (V_p)	Categorización	Nivel de vulnerabilidad
1	Muy Baja	El sistema no presenta problemas de producción ni distribución respecto a la operación normal.
2	Baja	Se emplean medidas que permiten operar sin afectar la producción ni distribución.
3	Medio	Se afecta la producción, pero sin afectar la distribución.
4	Alto	Se afecta parcialmente la distribución.
5	Muy Alta	Se interrumpe completamente la distribución.

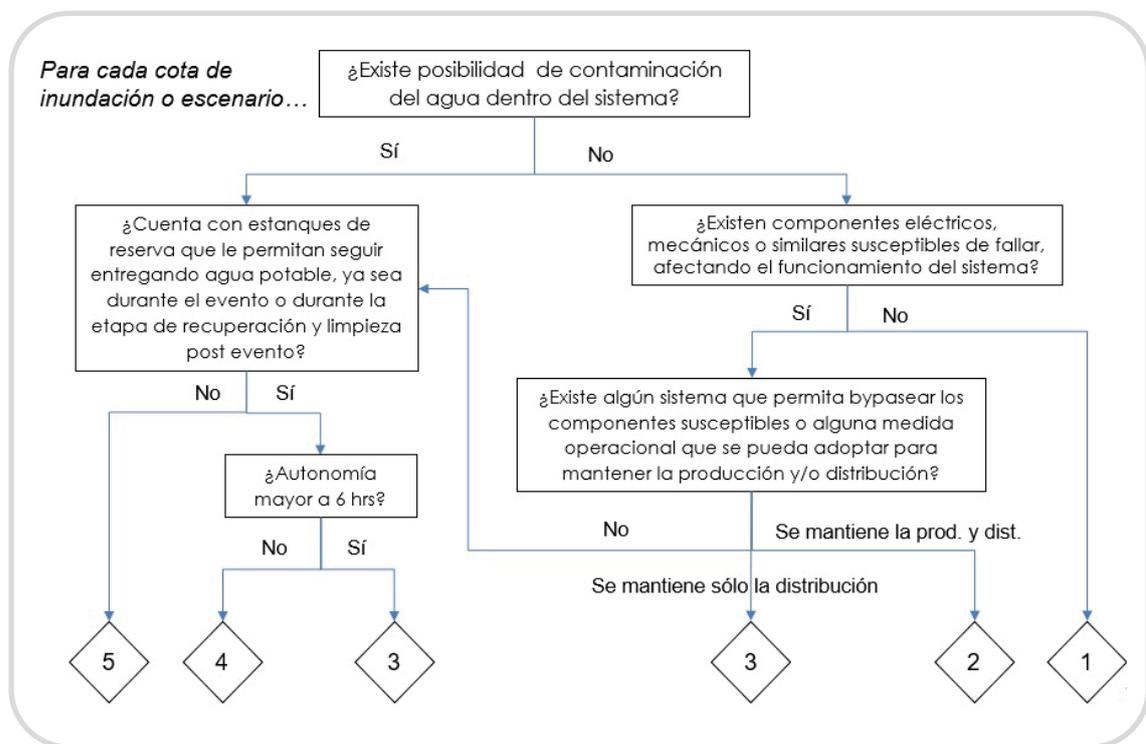


Figura 10. Árbol de decisión para la estimación de la vulnerabilidad operacional.

En el caso de las amenazas de tsunami, inundación y aluvión, se requiere un paso intermedio entre el cálculo de la vulnerabilidad y el índice final de riesgo operacional. Puesto que para dichas amenazas los impactos al sistema dependen de la magnitud del evento, y en dónde cada evento tiene una probabilidad de ocurrencia distinta, se debe calcular una vulnerabilidad esperada (V_e), definida como:

$$V_e = \int_0^1 V(IA) dIA \tag{3}$$

Dónde,

- IA es el índice de amenaza de un evento de cierta magnitud (definidos a priori, ya sea por periodos de retornos o según las cotas de los elementos dentro de la planta).
- $V(IA)$ es la vulnerabilidad del sistema frente a un evento de esa magnitud.

De este modo, se calcula primero el índice de amenaza para las distintas alturas de agua, y luego, para cada una de esas alturas, se define un índice de vulnerabilidad de acuerdo con la Tabla 13 y la Figura 10. Con los índices de amenaza y la vulnerabilidad para cada altura de inundación, se calcula finalmente la vulnerabilidad esperada. La Figura 11 resume los pasos que se deben seguir, en donde la vulnerabilidad esperada corresponde al área bajo la curva del gráfico en la esquina inferior derecha.

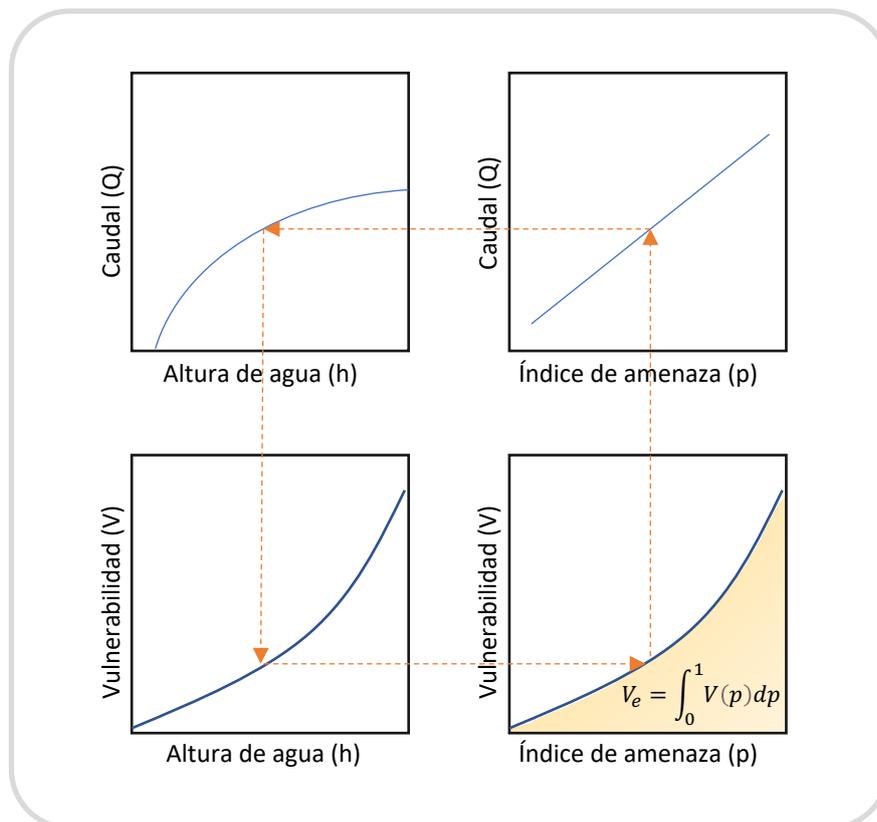


Figura 11. Resumen del proceso de cálculo de la vulnerabilidad esperada.

3.4 Vulnerabilidad ante Amenaza de Aluvión

La vulnerabilidad en el caso de la amenaza de aluvión se hace de la misma manera que para el caso de tsunami, es decir, para cada nivel de amenaza se calcula el índice de amenaza y la vulnerabilidad para cada nivel de acuerdo con la Tabla 11 y Figura 10.

3.5 Vulnerabilidad ante Amenaza de Remoción en Masa

Para estimar la vulnerabilidad frente a la amenaza de remoción en masa se utilizan los mismos criterios que para el caso de inundación y aluviones, es decir, se define cuál sería el impacto en términos de producción y distribución del sistema frente a un evento de remoción en masa según los criterios establecidos en la Tabla 11. La zona afectada y la magnitud del fenómeno, dependerá del análisis de susceptibilidad realizado en el lugar de emplazamiento de las obras.

3.6 Vulnerabilidad ante Amenaza de Turbidez

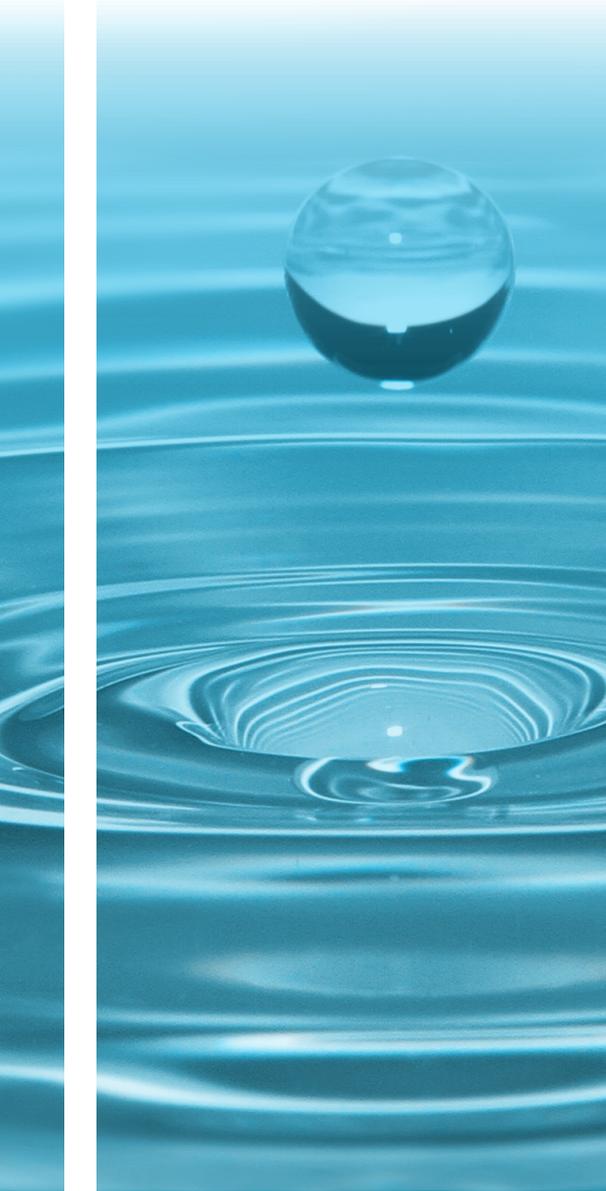
Para estimar la vulnerabilidad operacional de sistemas de producción de agua ante eventos de turbidez se deben considerar las características propias de cada sistema de producción relativas al tratamiento y extracción de la turbidez. En base a las características del sistema de producción de agua potable es posible determinar un índice de vulnerabilidad (índice VEN) del sistema de producción, los valores representativos de dicho índice y su nivel de vulnerabilidad se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Vulnerabilidad para turbidez.

Índice VEN (V_i)	Categorización	Nivel de vulnerabilidad
1	Muy Baja	La probabilidad de que el sistema de producción presente problemas de distribución o de gestión del agua respecto a la operación normal ante eventos de turbidez que superan la turbidez de diseño es muy baja o nula.
2	Baja	Dada las características que posee el sistema de producción, existe una baja probabilidad que la producción se vea afectada durante eventos de turbidez sobre el nivel de diseño, por lo que la distribución no se ve afectada.
3	Medio	Dada las características que posee el sistema de producción, es probable que se vea afectada parcialmente la producción, pero no la distribución durante eventos de turbidez sobre el nivel de diseño.
4	Alto	Dada las características que posee el sistema de producción, existe una alta probabilidad que la producción y distribución se vean afectadas durante eventos de turbidez sobre el nivel de diseño.
5	Muy Alta	Durante el periodo que se presenta turbidez sobre el nivel de diseño es muy probable que se interrumpa la producción y distribución.

Para determinar cuál es el índice de vulnerabilidad más adecuado se deben conocer las siguientes características:

- Tipo de fuente de abastecimiento (captación del agua cruda) principal, pudiendo ser superficial o subterránea.
- Existencia y porcentaje de suministro que puede(n) suplir la(s) fuente(s) alternativa(s) (estanques de agua cruda, embalses, captación subterránea, entre otras), referido al abastecimiento necesario para la producción normal (caudal de salida).
- Existencia de la etapa de pre-sedimentación (pre-decantación) o bien, existencia de la etapa de desarenado.
- Existencia de etapa de coagulación y floculación que cuentan con químicos necesarios para eventos de turbidez.



- Existencia de etapa de sedimentación (decantación).
- Tipo de extracción de lodos desde sedimentadores:
 - o Continua si el lodo se remueve a través de un mecanismo de manera ininterrumpida. Ejemplo: sedimentadores tipo Pulsator.
 - o Periódica si el tanque trabaja un tiempo determinado y luego se vacía para su limpieza. Ejemplo: extracción manual de lodos.
- Existencia de tanques de pre-sedimentación, desarenado o sedimentación adicionales a los necesarios para la operación normal.
- Presencia de estanques de reserva con agua tratada y el porcentaje que puede suplir respecto a producción normal.

Una vez recopilada la información anterior, se procede a responder un árbol de decisión que permite determinar el índice de vulnerabilidad (puede ser un valor decimal). El árbol de decisión ha sido programado en Macros de Excel y se adjunta en los anexos. Es importante señalar que el número de preguntas a responder depende de las características del sistema de producción de agua potable, por ejemplo, si la fuente principal de captación es subterránea, solamente con responder la primera pregunta (Tipo de fuente de abastecimiento principal) se determina automáticamente el índice de vulnerabilidad asociado. En la Figura 12 se muestra una imagen de su interfaz al momento de abrir el programa.

Instrucciones:

- Para responder una pregunta debe **seleccionar la celda ubicada a la derecha de la pregunta** (por ejemplo, si se desea responder la pregunta de la celda C9 debe hacer click en la celda D9) y luego hacer click sobre la flecha desplegable. Finalmente, seleccione la alternativa que represente mejor su caso.
- Una nueva pregunta aparecerá de manera automática una vez que se responde la pregunta actual. Para responder las nuevas preguntas asegúrese de seleccionar la celda a la derecha de esta pregunta (por ejemplo, si ya se respondió la pregunta de la celda C9 y desea responder la pregunta de la celda C10 debe asegurarse que la celda D10 esté seleccionada)
- En ningún caso debe dejar celdas en blanco. Escoja la alternativa que mejor represente su caso.**
- Solamente responda las preguntas a través del proceso descrito. No modificar otras celdas.
- Para reiniciar el cuestionario, presione el botón "Reiniciar".
- Si comete algún error y desea cambiar alguna respuesta se recomienda reiniciar el cuestionario.

PREGUNTAS	RESPUESTAS
Tipo de fuente de abastecimiento (captación de agua cruda) principal.	<div style="border: 1px solid gray; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 2px;"> Sanedical Subterránea </div> <div style="text-align: center; margin-top: 5px;"> <input type="button" value="REINICIAR"/> </div>

Figura 12. Interfaz de usuario árbol de decisión turbidez.

En las preguntas asociadas al porcentaje de suministro que puede(n) suplir la(s) fuente(s) alternativa(s), y al porcentaje que pueden suplir los estanques de reserva, respecto a producción normal, el usuario debe seleccionar el valor más cercano dentro de las opciones disponibles, las cuales son: 0 o no existe, 25%, 50%, y 75% o más. Por ejemplo, si los estanques de reserva pueden suplir el 5%, se deberá seleccionar el valor 0 o no existe para la pregunta asociada al porcentaje que pueden suplir los estanques de reserva; si la(s) fuente(s) alternativas pueden suplir un 40% se deberá seleccionar el valor 50% para la pregunta asociada al porcentaje que puede(n) suplir la(s) fuente(s) alternativa(s). En caso de que el usuario posea un porcentaje medio entre los valores disponibles se deberá seleccionar el menor, por ejemplo, si los estanques de reserva pueden suplir el 37,5% (media de 25% y 75%) se deberá seleccionar el valor de 25%.

4. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE

Finalmente, para la evaluación de riesgo de los sistemas de producción de agua potable se han de llevar a cabo dos pasos. En primer lugar, es necesario el desarrollo de un índice de riesgo para poder conocer el nivel de riesgo de manera determinística considerando tanto las amenazas a las que se encuentra expuesta la infraestructura de producción de agua potable como la vulnerabilidad intrínseca de esta frente a cada una de ellas. En segundo lugar, con este índice se puede acceder a una matriz que permite jerarquizar diferentes niveles de riesgo en función del índice mismo y el caudal de diseño de la infraestructura analizada.

4.1 Índice de riesgo

Como ya se ha mencionado, la evaluación de riesgo consta en primer lugar del cálculo de un índice de riesgo (IR). Se trata de una medida determinística del riesgo, la cual nos permite obtener un único valor de IR para cada amenaza y, a su vez, un valor total de este para posteriormente acceder a la matriz de riesgo. Para el cálculo del Índice es necesario conocer, por un lado, el índice de frecuencia de las amenazas a las que se encuentra expuesta la infraestructura de producción de agua potable y, por otro, la vulnerabilidad operacional particular del sistema analizado para cada una de las amenazas. Tal y como se ha podido observar en los apartados previos de la Guía, para calcular el Índice se consideran un máximo de seis amenazas: sismos, tsunamis, inundaciones, aluviones, remociones en masa y turbidez. Dichas amenazas se han de tener en cuenta en el cálculo, únicamente, cuando el territorio o sistema analizado se encuentre expuesto a ellas. Es decir, no necesariamente siempre se contabilizarán las seis amenazas. En cuanto a la vulnerabilidad operacional del sistema, esta se analiza como ya se ha mostrado de manera individual y particular para cada amenaza.

En ciertas ocasiones es necesario un paso intermedio para el cálculo de la vulnerabilidad física, como es el caso de la amenaza sísmica o en el caso de inundación, tsunami, aluvión y remoción en masa que requieren del cálculo de una vulnerabilidad esperada (V_e).

Una vez seguidos todos los pasos mencionados anteriormente, se debe proceder a aplicar la fórmula que permite calcular el índice de riesgo, la cual se presenta a continuación:

$$IR = \sum_i^n IR_i = \sum_i^n (\beta \cdot V_i \cdot IA_i) \quad (4)$$

Donde se lleva a cabo una compilación de cada índice de riesgo particular por amenaza. La sumatoria va de i hasta n , siendo n el total de amenazas consideradas e i la amenaza particular analizada en esa iteración. Por otro lado:

- β es una variable dummy que permite activar/desactivar la amenaza en función del caso de estudio y del territorio de análisis. Únicamente tendrá valor 1 para aquellas amenazas que se encuentren presentes en la zona de estudio.
- V_i es la vulnerabilidad operacional del sistema expuesto a la amenaza i . Considera la susceptibilidad del sistema y sus componentes a sufrir algún daño que interrumpa o modifique su operación normal, afectando o no a la producción de agua potable. Se expresa en número enteros, con un rango de 1 a 5 y se define en cinco intervalos que van desde "Muy bajo" (1) hasta "Muy alto" (5). Es particular de cada amenaza. Para un mayor detalle de su cálculo revisar de nuevo el apartado 3 "Estimación de la vulnerabilidad operacional".
- IA_i es el índice de frecuencia de la amenaza i . Considera la posibilidad de que un evento tenga lugar en un periodo de tiempo determinado y afecte a la ubicación del sistema de producción analizado. Presenta un rango de 0,01 a 1 diferenciando un total de cuatro intervalos que van desde "Muy baja" (0,01-0,1) a "Alta" (0,7-1). Este índice es particular de cada amenaza. Para un mayor detalle de su cálculo volver al apartado 2 "Estimación de la frecuencia de ocurrencia de amenazas naturales".

Como ya se ha mencionado, es importante remarcar que, en el caso de las amenazas de tsunami, inundación y aluvión, se requiere un paso intermedio entre el cálculo de las vulnerabilidades mostrados en los apartados anteriores y el cálculo final del riesgo. Puesto que para dichas amenazas los impactos al sistema dependen de la magnitud del evento, y en donde cada evento tiene una probabilidad de ocurrencia distinta, se debe calcular una vulnerabilidad esperada (V_e). Esta vulnerabilidad esperada es ingresada luego a la ecuación (4), con un índice de frecuencia de la amenaza igual a 1, ya que la probabilidad de ocurrencia de cada evento está implícita en la ecuación (3).

4.2 Matriz de riesgo

Una vez obtenido el índice de riesgo, tanto particular por amenaza como su valor total, se puede avanzar al siguiente paso. Para poder acceder a la matriz, primero es necesario conocer el nivel de riesgo operacional en función del valor de IR. Para determinar el intervalo de IR en que se encuentra el caso de aplicación primero es necesario conocer el IR individual de cada amenaza, el IR total y, por supuesto, el número de amenazas activas en el territorio de estudio. Así pues, en primer lugar, se ha de evaluar el IR compilado para todas las amenazas e identificar el nivel cualitativo de IR que le corresponde según lo indicado en la Tabla 15 y teniendo en cuenta el número de amenazas activas en el caso. En segundo lugar, se debe identificar el IR_i de mayor valor asociado a la amenaza correspondiente y, de este modo, volver a la Tabla 15 a evaluar su nivel, en esta ocasión revisando la fila correspondiente a 1 amenaza. De este modo, el nivel cualitativo de IR será el más restrictivo entre ambas opciones y, por tanto, será ese nivel el que permita el acceso a la matriz para finalmente conocer el nivel de riesgo en el que se puede clasificar el sistema de producción de agua potable analizado.

Tabla 15. Definición de los niveles cualitativos de IR.

Número Amenazas	Bajo $IR \leq a$	Moderado $a < IR \leq b$	Alto $b < IR \leq c$	Muy Alto $IR > c$
	a	b	c	
1	0,6	1,2	2,2	
2	1,7	2,8	4,2	
3	3,0	4,4	5,9	
4	4,3	5,9	7,6	
5	5,5	7,2	9,2	
6	5,8	7,6	9,5	

Así pues, para acceder a la matriz de riesgo, como se aprecia en la Tabla 16, es necesario conocer, por un lado, el nivel del Índice de Riesgo Operacional calculado previamente (IR) y, por otro, a modo de variable de exposición se requiere el dato asociado al caudal de diseño del sistema de producción de agua analizado en el caso de estudio. Este último es un factor general para todas las amenazas.

Tabla 16. Definición de matriz de riesgo

EXPOSICIÓN ($Q_{\text{diseño}}$, l/s)	RIESGO OPERACIONAL (IR)			
	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto
Baja ($Q \leq 20$)	Verde	Verde	Amarillo	Rojo
Media ($20 < Q < 200$)	Verde	Amarillo	Amarillo	Rojo
Alta ($Q \geq 200$)	Verde	Amarillo	Rojo	Rojo

De este modo, el usuario de la metodología de evaluación de riesgo de sistemas de producción de agua potable podrá conocer su nivel de riesgo final en función del color de la matriz asociado a su caso.

Así pues, en primer lugar, a partir del valor numérico obtenido en el cálculo del IR, se tendrá un valor cualitativo del mismo. El índice de riesgo se clasifica en cuatro niveles que van desde "Bajo" a "Muy Alto". El valor numérico del IR indica en qué nivel de éste se encuentra el sistema. En segundo lugar, como dato base necesario para ejecutar el caso de aplicación, es imprescindible conocer el caudal de diseño del sistema de producción de agua potable, ya sea este de nueva construcción por completo o una ampliación de un sistema ya existente. En caso de tratarse de una ampliación, hay que considerar si dicha mejora modificará el caudal de diseño del sistema original.

Finalmente, una vez descritas las dos variables que permiten la aplicación de la matriz de riesgo, únicamente cabe destacar los diferentes niveles de riesgo resultantes en función del color asignado. Se distinguen tres colores en función de la "intensidad" del riesgo asignado, partiendo por un verde como el nivel más bajo de riesgo, seguido de un amarillo como valor intermedio y, finalmente un rojo que marcaría el nivel de riesgo más alto. Esta escala semafórica permite aplicar la metodología y conocer el nivel de riesgo de manera visual e intuitiva. Cada escala definida por su correspondiente color debería implicar unas exigencias determinadas y unas medidas de mitigación necesarias para paliar el riesgo detectado. Es importante destacar que, si en la Tabla 15 resulta más restrictivo el nivel asociado a un IR_i particular de una amenaza, el sistema de producción es especialmente vulnerable a dicha amenaza. Esto permite marcar un camino claro hacia donde enfocar los esfuerzos de mitigación y que permitirían una reducción eficaz del riesgo evaluado.

5. REFERENCIAS

ALA. (2001). "Seismic Fragility Formulation for Water Systems." American Lifelines Alliance, 104.

Castro, S., Arróspide, F., Poulos, A., Alberto, Y., De la Llera, J.C., (2020). Construction and risk evaluation of a water system network under seismic hazard in Central Chile. 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan, September 13 to 18, 2020.

Crempien, J.G.F., Urrutia, A., Benavente, R. et al. Effects of earthquake spatial slip correlation on variability of tsunami potential energy and intensities. *Sci Rep* 10, 8399 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65412-3>

Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.* (5): 1583–1606.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2020). Guidelines and Standards for Flood Risk Analysis and Mapping Activities Under the Risk MAP Program. <https://www.fema.gov/flood-maps/guidance-partners/guidelines-standards>

Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., Pastén, C. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction. *Bulletin of the Seismological Society of America.* 15: 1853-1880.

Instituto Nacional de Normalización (INN). Diseño sísmo-resistente de edificios, NCh433 Of.1996 Mod 2009. Santiago, Chile; 2009.

Montalva, G., Bastías, N., y Rodríguez-Marek, A. (2017). Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America.* 107 (2): 901-911.

Muhari A., Imai K., Sugawara D., Imamura F. (2015) A Method to Determine the Level 1 and Level 2 Tsunami Inundation Areas for Reconstruction in Eastern Japan and Possible Application in Pre-disaster Areas. In: Santiago-Fandiño V., Kontar Y., Kaneda Y. (eds) *Post-Tsunami Hazard. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 44. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10202-3_10

Pitilakis, K., Crowley, H., and Kaynia, A. (2014). SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk. Springer, New York, NY.

Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., and de la Llera, J. C. (2019). "An updated recurrence model for Chilean subduction seismicity and statistical validation of its poisson nature." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1), 66–74.

