

Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), noviembre-diciembre 2024,
Volumen 8, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6

VALORACIÓN DEL ÍNDICE DE SEGURIDAD DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN EL PERÚ

**ASSESSMENT OF THE DRINKING WATER SUPPLY
SECURITY INDEX IN PERÚ**

Gustavo Olivas Aranda

Dirección de Fiscalización, Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento

Gretelina Castañeda Sánchez

Dirección de Fiscalización, Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento

Ronald Jaúregui Chipana

Dirección de Fiscalización, Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento

John Montero Pacchioni

Asesor del proyecto PROAGUA

Wolfgang Krinner

Asesor del proyecto PROAGUA

Valoración del Índice de Seguridad del Abastecimiento de Agua Potable en el Perú

Gustavo Olivas Aranda¹

golivas1@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-7852-3038>

Dirección de Fiscalización, Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS)
Perú

Ronald Jaúregui Chipana

ronald.jauregui.c@uni.pe

<https://orcid.org/0009-0006-0861-413X>

Dirección de Fiscalización, Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS)
Perú

Wolfgang Krinner

wkrinner@gmx.net

<https://orcid.org/0009-0009-7769-9642>

Asesor del proyecto PROAGUA

Perú

Gretelina Castañeda Sánchez

gretelcs@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-3147-4556>

Dirección de Fiscalización, Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS)
Perú

John Montero Pacchioni²

john2mp@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-2942-0975>

Asesor del proyecto PROAGUA
Perú

RESUMEN

La seguridad hídrica de abastecimiento de agua se define como la posibilidad de acceder al agua potable en cantidad y calidad adecuadas con un alto grado de probabilidad, considerando las particularidades geográficas de cada una de las empresas prestadoras de servicios de saneamiento y buscando medir la resiliencia de estas frente a amenazas como la sequía, lluvias intensas, inundaciones, sismos, entre otros. Alcanzar la seguridad hídrica es un desafío complejo que requiere entender el sistema climático, su manifestación regional y local, y contar con una gobernanza adecuada que actúe ex ante y permita reducir la interrupción de los servicios de agua potable y alcantarillado frente a eventos naturales extremos que cada vez son más frecuentes. Este documento analiza la relevancia del índice de seguridad de abastecimiento de agua para respaldar la toma de decisiones en esta materia, abordando la actual disponibilidad de agua en las localidades del país, su sismicidad, en un contexto de cambio climático, considerando también las condiciones legales y de gobernanza en el Perú. Puede servir de referencia para que otros países construyan índices similares, evaluando las condiciones naturales, la robustez de los sistemas de abastecimiento y las capacidades para gestionar las situaciones de emergencia.

Palabras clave: seguridad de abastecimiento de agua, índice de seguridad hídrica, resiliencia, saneamiento, robustez

¹ Autor principal

Correspondencia: golivas1@hotmail.com

² que es apoyado por la cooperación alemana para el desarrollo implementada por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, y la Cooperación Económica Suiza – SECO.

Assessment of the Drinking Water Supply Security Index in Perú

ABSTRACT

Water security of water supply is defined as the possibility of accessing drinking water in adequate quantity and quality with a high degree of probability, considering the geographic particularities of each of the sanitation service providers and seeking to measure their resilience to threats such as drought, heavy rains, floods, earthquakes, among others. Achieving water security is a complex challenge that requires understanding the climate system, its regional and local manifestation, and having adequate governance to act ex ante and reduce the interruption of drinking water and sewerage services in the face of increasingly frequent extreme natural events. This document analyzes the relevance of the water security index to support decision making in this area, addressing the current availability of water in the country's localities, its seismicity, in a context of climate change, and the legal and governance considerations in Peru, and can serve as a reference for other countries to build similar indexes, evaluating: natural conditions, the robustness of supply systems and the capacities to manage emergency situations.

Keywords: water supply security, water security index, resilience, sanitation, robustness.

Artículo recibido 21 noviembre 2024

Aceptado para publicación: 30 diciembre 2024



INTRODUCCIÓN

La seguridad de los sistemas de suministro de agua está cada vez más en el punto de mira de gestores de empresas de agua, reguladores y decisores políticos, ya que, por un lado, los sistemas de abastecimiento están sintiendo mayor estrés debido al aumento de la población y el creciente grado de urbanización. Por otro lado, en muchos casos, el cambio climático puede dar lugar a un aumento de la demanda, una menor disponibilidad de agua, mayores variaciones estacionales e interanuales y, eventualmente, episodios meteorológicos más intensos. Todas esas tendencias aumentarán la presión sobre los sistemas de abastecimiento y obligarán a los decisores a tomar medidas que mejoren la seguridad de los sistemas. En muchas partes del mundo, las empresas de agua tienen dificultades para ofrecer servicios de agua y saneamiento fiables incluso en condiciones normales. Los decisores políticos y los reguladores nacionales tienen un papel importante que desempeñar en la supervisión y el apoyo de los prestadores de servicios para lograr unos servicios de agua fiables, sostenibles y de calidad. Los indicadores para monitorear la calidad y la seguridad del servicio son esenciales en este proceso.

El uso de indicadores para cuantificar la seguridad del suministro de agua urbano no es nuevo, pero ha ganado impulso en los últimos años a medida que más países reconocen la necesidad de un enfoque integral para gestionar los riesgos que amenazan los sistemas de suministro de agua. Al utilizar indicadores, los prestadores de servicios y los reguladores nacionales pueden evaluar el estado actual de los sistemas de abastecimiento, identificar la necesidad de mejoras y hacer un seguimiento del progreso a lo largo del tiempo. Esta información también puede utilizarse para tomar decisiones políticas, asignar recursos y priorizar acciones para mejorar la seguridad del sistema.

La seguridad de abastecimiento viene a ser la capacidad que posee un sistema para satisfacer la demanda de agua con un alto grado de probabilidad, pudiendo dar servicio aún en condiciones difíciles y durante la ocurrencia de eventos extremos (SUNASS, 2022). Para ello, es crítico evaluar el conjunto de condiciones técnicas y organizacionales que posee un sistema de agua potable para poder desempeñar sus funciones y recuperarse adecuadamente ante situaciones de emergencia, para el cual se propone cuantificar la seguridad mediante un indicador compuesto.



MARCO TEÓRICO

Métodos para cuantificar la seguridad del abastecimiento de agua

Se han propuesto varios métodos para cuantificar la seguridad de los sistemas de suministro de agua. Algunos indicadores miden la disponibilidad (o escasez) de agua en relación con la población (Falkenmark, 1989). Otros indicadores tratan de tener en cuenta también la capacidad de almacenamiento y los balances hídricos de un territorio (Damkjaer and Taylor, 2017; Padowski and Jawitz, 2012). También existen métodos que analizan la competencia por el uso del agua entre diferentes sectores, principalmente el uso urbano y la agricultura (Floerke et al., 2018).

Hay diferentes estudios que tratan de cuantificar la seguridad hídrica de los sistemas a nivel de ciudades. Krueger et al. (2018) presentan un método que evalúa la seguridad de un sistema de abastecimiento diferenciando dos componentes: 1) Los servicios públicos ofrecidos por la municipalidad a través de una organización formal (p.ej. una empresa de agua), y 2) las medidas de adaptación y soluciones autogestionadas por la propia comunidad que sustituyen el servicio no ofrecido por la empresa pública. En el primer componente se consideran cuatro dimensiones (“capitales”): disponibilidad de recursos hídricos, infraestructura, capital financiero y capacidad de gestión. El método se aplica a siete ciudades. Para cada ciudad, se analiza el nivel de exposición a los *riesgos* específicos, el “*capital*” disponible para hacer frente a esos riesgos (dentro de cada una de las dimensiones) y la *robustez* del sistema, es decir su capacidad de responder a choques y fallos.

En otro trabajo Jensen y Wu (2018) proponen un indicador de seguridad de agua urbana que evalúa cuatro áreas (“índices”) relevantes para la seguridad de abastecimiento: recursos hídricos, acceso a los servicios de agua, riesgos y aspectos de gobernanza. En función de las características de la ciudad analizada y la disponibilidad de información definen una serie de indicadores y sub-indicadores dentro de cada una de estas áreas. En un estudio piloto el método se aplica a las ciudades de Singapur y Hong Kong, analizando la evolución de estos indicadores a la largo de un periodo de 15 años.

Dickson (2016), Doeffinger (2021), Tolba et al. (2020) y Babel et al. (2023) proponen medir la seguridad hídrica a través de índices que, entre otros, incluyen diferentes aspectos para su cálculo, como la calidad, oferta y la accesibilidad al agua. Tolba et al. (2020) y Babel et al. (2023) consideran dentro

de la estimación de la accesibilidad el acceso económico, incluyendo factores como equidad y costos, además del acceso a fuentes seguras.

Otro aspecto importante que resaltar es la resiliencia, definida como la capacidad de un sistema de recuperarse ante un eventual evento. Chiquito et al. (2019) y Arreguín-Cortez et al. (2016) la consideran como una dimensión a medir al nivel del sistema de agua, mientras que para Dickson et al. (2016), Tolva et al. (2020) y Sultana et al. (2022) es la capacidad que tienen las ciudades con sus respectivas instituciones en conjunto para recuperarse de eventos extremos. Por ello, plantean también como dimensión a evaluar la gestión, es decir tratan de medir la capacidad de planificación, regulación y administración de los recursos hídricos.

Por otro lado, Arreguín-Cortez et al. (2016) y Doeffinger y Hall (2021) expresan la importancia de contar con un índice de seguridad hídrica como herramienta comparativa sobre la situación hídrica en México y Estados Unidos, respectivamente, aunque es fundamental contar también con un indicador que permita evaluar la seguridad hídrica en diferentes escenarios de cambio climático, tal como plantean Chiquito et al. (2019) y Arreguín-Cortez et al. (2020), con la finalidad de identificar posibles impactos y determinar estrategias de mitigación para garantizar el suministro de agua.

Por ello, Babel et al. (2023) y Arreguín-Cortez et al. (2020) coinciden en manifestar la importancia de los resultados y comparaciones de las estimaciones de los índices, pues permiten tomar decisiones informadas para identificar áreas con mayores necesidades y a diseñar estrategias e intervenciones específicas para abordar las amenazas a la seguridad hídrica en las ciudades.

Otro enfoque para analizar la seguridad de un sistema de abastecimiento son los métodos que se emplean en la evaluación y gestión de los riesgos de desastres. Típicamente consisten en un análisis de los peligros, con una definición de los escenarios de peligros más relevantes, y una evaluación de la vulnerabilidad de los componentes de un sistema para cada escenario de peligro. Como resultado de este proceso, se presenta un análisis de la potencial afectación de los componentes y, por tanto, del servicio para los diferentes escenarios de peligro y una recomendación de las medidas a adoptar para reducir el riesgo de que el sistema sufra daño en el caso de que se produzca alguno de los peligros. Este método se sigue, por ejemplo, en la Herramienta de Redes de Agua para la Resiliencia de la EPA (Haxton, 2022). También es la base de los análisis de riesgo realizados en el marco del Sistema Peruano

de Gestión del Riesgo de Desastres (INDECI 2021). Tanto para la evaluación de los riesgos y vulnerabilidades como para la priorización de las medidas se usan métodos semi-cuantitativos. Sin embargo, no incluye y no es el objetivo de esta metodología la cuantificación del riesgo del sistema en su conjunto, ni tampoco la comparación del nivel de seguridad de diferentes sistemas de abastecimiento.

Antecedentes en el Perú

En el Perú, la seguridad de los sistemas de suministro de agua es un tema importante. Gran parte de la población (66%) vive en zonas costeras donde sólo se cuenta con el 1,8% del total de la disponibilidad hídrica (ANA, 2013). Perú está particularmente expuesto a variaciones naturales de la disponibilidad de agua, con ciclos húmedos y secos muy pronunciados (fenómeno El Niño-La Niña). Ubicado en una zona sísmica en el límite entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamérica, los terremotos también son eventos comunes en el Perú. Las lluvias intensas regularmente causan inundaciones y deslizamientos de tierra.

El patrón de ocupación del territorio es en gran medida sin planificación y sin control, lo cual está potenciando los niveles de vulnerabilidad frente a los fenómenos naturales, además de demandar recursos adicionales para asegurar la infraestructura y la operación de los servicios de saneamiento. La vulnerabilidad de los sistemas está influenciada también por condiciones sociales, económicas y ambientales. La infraestructura suele presentar un mayor nivel de exposición a los peligros en las zonas donde se encuentran asentamientos humanos en condiciones precarias, especialmente en áreas marginales de zonas urbanas.

Muchas empresas de agua tienen dificultades para proporcionar un servicio fiable debido a la falta de recursos financieros y personal calificado. Actualmente, solo el 91% de la población nacional está conectada a un sistema público de suministro de agua (MVCS, 2023). La rápida urbanización y el crecimiento en muchos casos descontrolado de las ciudades están ejerciendo presión adicional sobre los sistemas de abastecimiento.

Como resultado de un terremoto en 2007 que afectó gravemente el suministro de agua en varias provincias del sur (Chincha, Ica y Pisco) y un evento extremo de lluvias e inundaciones (Niño Costero) en 2017, entre 2011 y 2020 se implementó un marco legal y regulatorio para la gestión del riesgo de desastres en los sistemas de suministro de agua. El regulador nacional SUNASS en su Reglamento de



Calidad de la Prestación del Servicio de Saneamiento (SUNASS, 2022) obliga a las empresas de agua a cumplir con los requisitos del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD, 2021). En las propuestas tarifarias de las empresas de agua, que deben ser aprobadas por SUNASS, se exige la creación de una provisión para acciones relacionadas con la gestión del riesgo de desastres, así como un seguro para hacer frente a los daños a las personas y la infraestructura causados por desastres. Sin embargo, en la práctica, la gestión del riesgo de desastres no se ha implementado suficientemente en el sector, y continúan existiendo importantes déficits en la robustez y la resiliencia en el suministro de agua urbano, exponiendo los sistemas a las consecuencias de eventos potencialmente catastróficos. La SUNASS, desde el año 2011 hasta el 2020, estimaba el “Indicador de gestión del riesgo de desastres (IGRD)”, el cual se calculaba sobre la base del cumplimiento de cuatro aspectos solicitados a las Empresas Prestadoras detallados en el anexo N°5 del Reglamento de Calidad de la Prestación de los Servicios de Saneamiento:

- Constitución de Comité de Emergencia.
- Plan de Emergencia aprobado.
- Plan de Mitigación aprobado.
- Sustento de la capacitación al personal y divulgación de los planes aprobados.

Sobre el particular, la Ley del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (Ley N° 29664 que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres), sobre la cual se alineó el IGRD en el 2021 consideró que el Comité de Emergencia constituye el grupo de trabajo en el seno de la Empresa Prestadora (EP) para la preparación y gestión del riesgo de desastres, el Plan de Emergencia equivale al Plan de Operaciones de Emergencia y el Plan de Mitigación al Plan de Prevención y Mitigación del Riesgo (SUNASS, 2021).

Por otro lado, el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 - “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” - requiere implícitamente la seguridad del abastecimiento del agua durante situaciones extremas, pues entre sus metas se destacan la meta 6.1 - “Acceso universal y equitativo al agua potable segura” - que implica también que durante una emergencia se debe proveer acceso rápido al agua potable para evitar enfermedades transmitidas por el agua, así como implementar

soluciones temporales o de emergencia, como plantas móviles de tratamiento de agua o distribución de agua embotellada y asegurar la equidad en la distribución del agua, priorizando a las poblaciones más vulnerables, como niños, ancianos y personas con discapacidades. La meta 6.2 - “Acceso a saneamiento adecuado y fin de la defecación al aire libre” - implica, además, que durante una emergencia se debe garantizar instalaciones de saneamiento seguras y temporales para prevenir la contaminación de fuentes hídrica y priorizar el establecimiento de zonas seguras para el saneamiento, evitando la proximidad de letrinas y desechos humanos a las fuentes de agua, mientras que la meta 6.3 - “Mejora de la calidad del agua y reducción de la contaminación” - es fundamental durante emergencias, pues implica tomar medidas de monitoreo de calidad del agua para asegurar que el suministro siga siendo seguro para el consumo, así como utilizar tecnologías de purificación de agua de emergencia, como tabletas de purificación, filtros portátiles o sistemas de tratamiento rápido en el lugar.

En resumen, hay una estrecha relación entre el ODS 6 y la seguridad del abastecimiento de agua, dada la importancia de garantizar acceso universal, de calidad y sostenible al agua potable aun durante una emergencia, lo cual requiere tanto infraestructuras resistentes como soluciones temporales, considerando también el acceso equitativo.

En el Perú, en la mayoría de los casos, la priorización de inversiones se realiza principalmente evaluando si un expediente técnico cumple con los requisitos normativos (admisibilidad y evaluación técnica establecidos a través de Resolución Ministerial 358-2021-VIVIENDA). Sin embargo, la demanda de financiamiento supera ampliamente la disponibilidad de los presupuestos institucionales anuales por la gran brecha de inversiones que existe. Además, los criterios de priorización de inversiones no consideran la evaluación del riesgo hídrico o la seguridad de abastecimiento de una localidad.

Índice de la seguridad de abastecimiento de agua potable

La Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS) es el regulador nacional de los servicios de agua y saneamiento en el Perú. Regula, norma y supervisa la provisión de los servicios de saneamiento por parte de los prestadores. Asimismo, fija las tarifas por la prestación de los servicios de saneamiento, dicta los reglamentos y normas que regulen los procedimientos a su cargo, así mismo,

verifica el cumplimiento de las obligaciones legales, contractuales o técnicas de las entidades supervisadas e impone sanciones en caso de incumplimiento.

Anualmente la SUNASS recopila datos sobre el desempeño de los prestadores y elabora un informe de benchmarking que presenta de una forma detallada y objetiva información sobre la calidad y fiabilidad de los servicios de agua y saneamiento de las empresas prestadoras (SUNASS, 2022b). En sus ediciones anteriores, el informe de benchmarking de SUNASS ya incluía información sobre las medidas de las empresas para la gestión de riesgos de desastres, como por ejemplo la conformación de comités de emergencia, la elaboración de planes de mitigación y la elaboración y difusión de planes de emergencia. Sin embargo, estas medidas sólo daban una medida indirecta de la preparación de la empresa para afrontar situaciones de riesgo.

Sin embargo, desde el año 2023, la SUNASS incorpora en su Sistema de Indicadores e Índices de la Gestión de los Prestadores de los Servicios de Saneamiento un nuevo Índice de Seguridad de Abastecimiento de Agua (ISAA), el cual trata de estimar la capacidad de un sistema de satisfacer la demanda de agua en situaciones difíciles y durante eventos extremos, con el fin de apoyar la toma de decisiones e implementar medidas que impacten positivamente en la seguridad y sostenibilidad del servicio ante situaciones de emergencia considerando la ocurrencia de eventos naturales extremos y los posibles efectos del cambio climático.

El índice de seguridad de abastecimiento de agua fue aplicado por SUNASS a las 50 empresas prestadoras de servicios de saneamiento, determinando el nivel de seguridad para cada una de ellas. Los resultados de este análisis fueron presentados en los informes de benchmarking regulatorio de los años 2021, 2022 y 2023.

El índice de seguridad está compuesto por 17 parámetros agrupados en tres áreas temáticas consideradas críticas para la seguridad de abastecimiento:

- Condiciones naturales (riesgos)
- Robustez del sistema de abastecimiento
- Capacidad para gestionar situaciones de emergencia

Gráfico 1: Áreas que conforman el índice de seguridad del abastecimiento (ISAA)



Dentro de cada área, SUNASS evalúa una serie de parámetros que tratan de dar una medida cuantitativa del nivel de seguridad (o riesgo) del sistema de abastecimiento. Los parámetros abarcan los aspectos más importantes para la seguridad del sistema y consideran información disponible y fácilmente accesible para la totalidad de las empresas prestadoras analizadas, permitiendo así el cálculo del índice como medida general de la seguridad de abastecimiento en el sector.

Condiciones naturales

Dentro de este apartado se evalúan parámetros asociados a los eventos de origen natural que pueden impactar significativamente en el abastecimiento del agua potable, considerando fenómenos hidrometeorológicos (lluvias intensas y sequías) y fenómenos geodinámicos (sismos y tsunamis). Las variables para determinar dichas condiciones son:

- a. Precipitación anual media de la cuenca (mm/año).
- b. Precipitación máxima diaria(mm).
- c. Indicador de variabilidad interanual del WRI.
- d. Indicador de variabilidad estacional del WRI.
- e. Nivel de peligro sísmico.

Robustez del sistema de abastecimiento

La robustez se interpreta como la capacidad de un sistema de seguir funcionando ante la ocurrencia de diversos escenarios de riesgo, teniendo la infraestructura y los procesos operativos la capacidad de adaptarse, responder y reconfigurarse ante la ocurrencia de una emergencia, manteniendo su funcionalidad. Las variables consideradas bajo este rubro son:

- a. Consumo unitario medido (l/hab/d).
- b. Agua no facturada (% de producción).
- c. Capacidad media de producción/ Consumo medio.
- d. Capacidad de almacenamiento (represas)/ Consumo anual.
- e. Porcentaje de aguas provenientes de fuentes subterráneas y de desaladoras en relación con la producción promedio total.
- f. Volumen reservorios/ Producción diaria media. **Capacidad para gestionar situaciones de emergencia**

En este apartado se analiza la capacidad técnica y operativa que posee el sistema para gestionar la situación ante la ocurrencia de un evento extremo. Está conformado por las siguientes variables:

- a. Nivel de sectorización de la red de distribución.
- b. Sistemas alternativos de suministro (camiones cisterna).
- c. Reserva para gestión del riesgo de desastres y adaptación al cambio climático.
- d. Plan de continuidad operativa.
- e. Plan de contingencia.
- f. Porcentaje de dependencia de un Punto Único de Fallo.

Los parámetros se evalúan previa normalización a una escala de 0 a 1. A cada parámetro se le asigna un peso específico, de forma que la suma de los parámetros ponderados dentro de cada rubro varía entre 0 (mínima seguridad) y 1 (máxima seguridad). El valor total del índice de seguridad se obtiene como la suma de los tres componentes.

El cálculo del índice de seguridad se realizará, por tanto, aplicando la siguiente expresión:

$$I_j = \sum (Parámetro\ i * Peso\ P_i)$$

$$ISAA = I_{CN} + I_R + I_{CG}$$

Donde:

I_{CN} Subíndice condiciones naturales

I_R Subíndice robustez del sistema de abastecimiento I_{CG} Subíndice capacidad de gestión de emergencias P_i Peso de cada una de las variables, ver Tabla 1.

ISAA Índice de seguridad de abastecimiento

Tabla 1: Características de los parámetros del ISAA

N°	Parámetros	Normalización [0-1]	Peso
I. Condiciones naturales (ICN)			
a)	Precipitación anual media de la cuenca, para determinar los periodos húmedos y secos.	0=>0; >=800=>1	20%
b)	Precipitación máxima diaria, que indica la probabilidad de huaicos e inundaciones.	0=>1; >=200=>0	20%
c)	Indicador de variabilidad interanual WRI, indica la variación de la disponibilidad de agua entre varios años.	0=>1; 1=>0	20%
d)	Indicador de variabilidad estacional WRI, indica la variación de la disponibilidad del agua en un año.	0=>1; 1=>0	20%
e)	Nivel de peligro sísmico, es la probabilidad de ocurrencia de un sismo.	0=>1; 1=>0	20%
II. Robustez del sistema de abastecimiento (IR)			
a)	Consumo unitario medido (l/hab/d)	<=100=>1; >=200=>0	15%
b)	Agua no facturada (% de producción)	0%=>1; >=50%=>0	15%
c)	Capacidad media de producción/ Consumo medio	100%=>0; >=250%=>1	20%
d)	Capacidad de almacenamiento (represas)/ Consumo anual (cuenca)	0%=>0; >=100%=>1	20%
e)	Porcentaje de aguas provenientes de fuentes subterráneas y de desaladoras en relación con la producción promedio total	0%=>0; >=100%=>1	20%
f)	Volumen reservorios/ Producción diaria media	0%=>0; >=50%=>1	10%
III. Capacidad para gestionar situaciones de emergencia (ICG)			

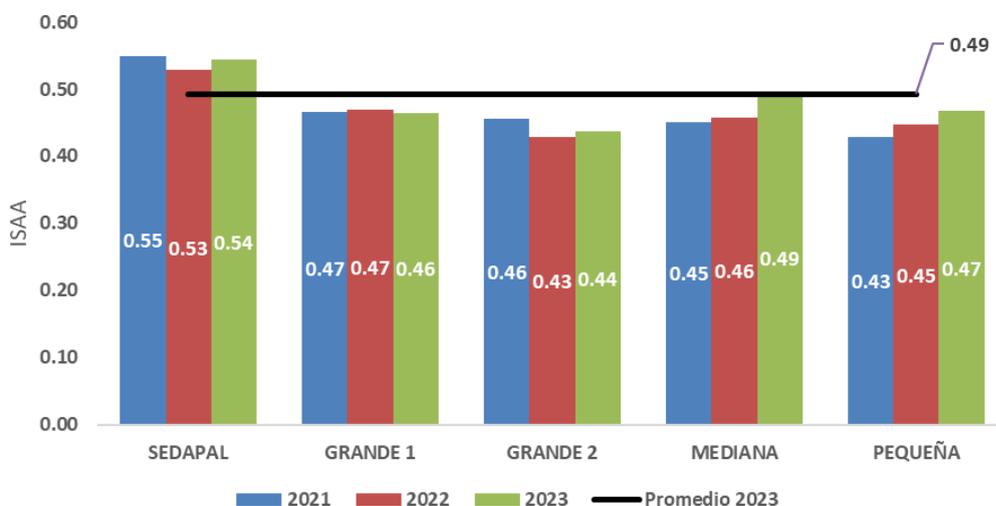
a)	Nivel de sectorización red de distribución	0=>0; 1=>1	20%
b)	Sistemas alternativos de suministro (camiones cisterna)	0%=>0; >=20%=>1	25%
c)	Reserva para gestión del riesgo de desastres y adaptación al cambio climático	0=>0; 1=>0	10%
d)	Plan de continuidad operativa	0=>0; 1=>1	10%
e)	Plan de contingencia	0=>0; 1=>1	10%
f)	Porcentaje de dependencia de un Punto Único de Fallo	0%=>1; >=100%=>0	25%

Fuente: SUNASS}

Análisis de resultados del ISAA 2021-2023

Las mediciones del ISAA que realizó la SUNASS en los años 2021, 2022 y 2023 fueron publicadas en los informes del Benchmarking Regulatorio, siendo los promedios nacionales de 0.49, 0.48 y 0.49, respectivamente. De acuerdo con el tamaño del prestador se tiene que para el 2023, las empresas con mejor puntaje por tamaño de prestador son: SEDAPAL (0.54), SEDACUSCO (0.63), EMAPA SAN MARTIN (0.56), AGUAS DE LIMA NORTE (0.60) y EPSSMU S.A. (0.58), de acuerdo con su tamaño.

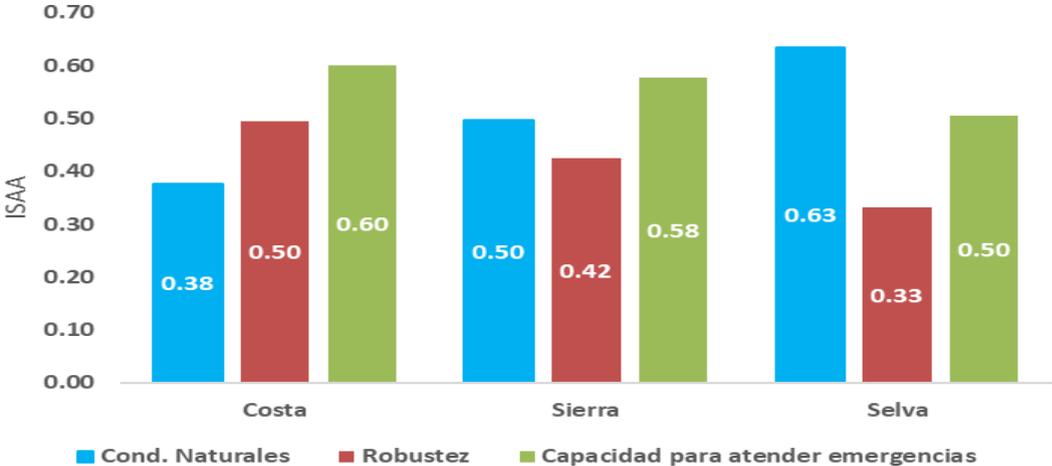
Gráfico 2: Comparativo del ISAA por tamaño de prestador (2021-2023)



Respecto a la desagregación del índice en sus tres componentes i) Condiciones naturales, ii) robustez del sistema de abastecimiento y iii) capacidad para gestionar situaciones de emergencia, este último aporta el mayor valor al puntaje promedio del índice (0.59). En contraste, el componente de la robustez de los sistemas de abastecimiento se cifra en 0.47 en promedio.

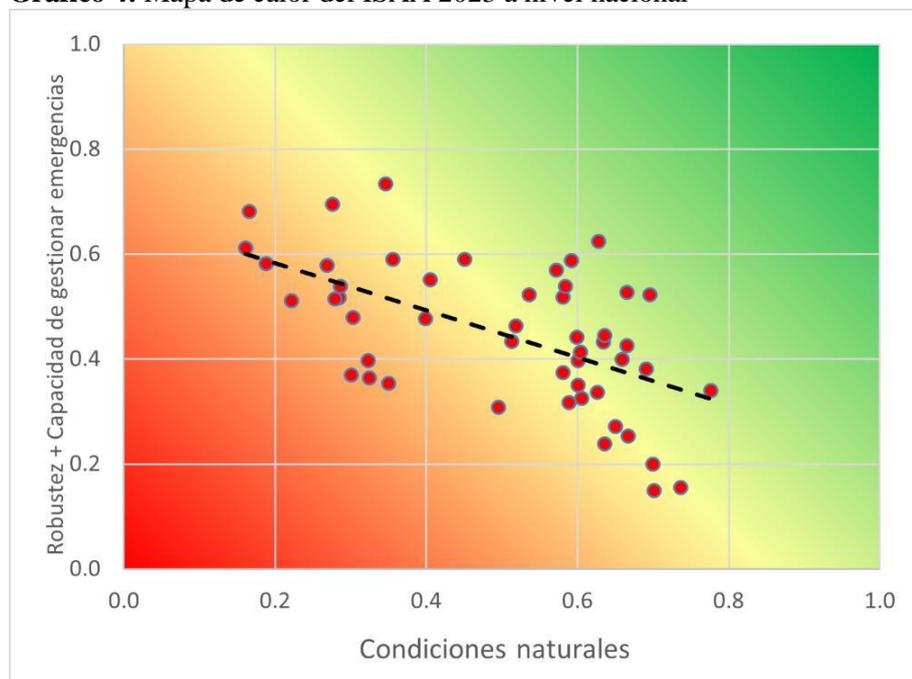
Al analizar la evolución del ISAA entre los periodos 2021-2023, se tiene una disminución del promedio nacional en 0.26%, debido principalmente a que 21 de los 50 prestadores registraron desempeño desfavorable en la implementación de medidas para mejorar su capacidad de gestionar emergencias. A nivel nacional, la EPS SEDA Huánuco (Grande 2) fue la que registró mayor descenso (32.8%), 20.8% en la robustez y 81.3% en la capacidad de gestionar emergencias. Si analizamos los resultados por grupos de prestadores, los mayores descensos fueron SEDAPAL (1.0%), SEDALIB (27.7%) en Grandes 1, EPS EMAPAT (25.4%) en medianas y la EPS AGUAS DEL ALTIPLANO (9.8%) en pequeñas. Mientras que la EPS RIOJA (58.7%) obtuvo el mayor crecimiento entre todas las EP del país. Al analizar las condiciones naturales del ISAA por regiones, tenemos que, para la costa, SEDAPAL tiene mejor condición (0.45) y la EPS GRAU (0.16) tiene la condición más desfavorable, para la sierra la EPS Sierra Central (0.78) con la mejor condición y SEDAPAR (0.28) presenta el valor más bajo, para el caso de la selva, la condición más favorable lo presenta Emapa SAN MARTIN (0.67) y la más desfavorable EMAPAB-Bagua (0.50). En general, la costa presenta condiciones naturales menos favorables en promedio (0.42), lo cual se explica por las condiciones meteorológicas adversas para la provisión del agua que es una característica de esta región; la selva (0.63) y la sierra (0.50), presentan mejores condiciones naturales puesto que la magnitud de las precipitaciones influye en la mejor disponibilidad hídrica que con respecto a la costa. La robustez y la capacidad de gestionar situaciones de emergencia es mayor en la costa para compensar las condiciones naturales desfavorables, mientras que, en la selva, estos parámetros son menores con respecto a las condiciones naturales.

Gráfico 3: Parámetros del ISAA por región natural



Se analizó el ISAA en un mapa de calor, donde se aprecia que la mayor concentración de prestadores se ubica en el cuadrante superior izquierdo, que presenta baja robustez y capacidad de atender emergencias bajo condiciones naturales favorables. La mejor posición la ocupa SEDACUSCO que precisamente tiene el mayor valor de ISAA.

Gráfico 4: Mapa de calor del ISAA 2023 a nivel nacional



DISCUSIÓN

El Plan Nacional de Saneamiento 2022-2026 del Perú indica como aspectos transversales: Investigación, Desarrollo e innovación (I+D+i), Gestión de Riesgo de Desastres (GRD), Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), Gestión Integral del Cambio Climático, Economía Circular y pertinencia cultural. Son los aspectos relevantes para los seis ejes que plantea el Plan. También son esenciales para alcanzar la seguridad del abastecimiento y la sostenibilidad integral de los servicios de saneamiento. El ISAA complementa ese enfoque, estableciendo un indicador que permite evaluar la situación y medir cuantitativamente el avance en estos aspectos.

El indicador de Gestión de Riesgo de Desastres (GRD) calculado por SUNASS para las 50 empresas prestadoras (actualmente 48 son empresas municipales, 1 empresa es del Estado y 1 está provisionalmente a cargo de un organismo del Ministerio) en sus informes anuales de Benchmarking de empresas prestadoras evalúa si la empresa prestadora cuenta con planes de continuidad operativa y/o de contingencias, así como si cuenta con un comité de emergencias. Sin embargo, es necesario poder

medir comparativamente las condiciones inherentes y externas que las empresas prestadoras enfrentan y los riesgos asociados para el abastecimiento de agua para uso poblacional.

En el Perú la tarifa de los servicios de agua y saneamiento cubre principalmente aspectos de operación y mantenimiento y una pequeña parte de las inversiones que requiere cada empresa municipal. El Estado a través del ente rector (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento) subvenciona a las empresas municipales realizando transferencias financieras para ejecutar gradualmente las inversiones requeridas para el cierre de brechas. Para ello, en la actualidad los criterios de priorización de los recursos contemplan indicadores generales (pobreza, tamaño, objetivos, entre otros). Contar con un índice de seguridad de abastecimiento del agua podría servir como un criterio adicional para la priorización en la asignación de recursos.

El aspecto de “Condiciones Naturales” del índice ISAA presentará escasa variación a lo largo del tiempo y no dependerá de los esfuerzos del prestador para los valores que se alcance. La “Robustez del Sistema” puede mejorarse tomando acciones como: reducir el % de Agua No Facturada (ANF), disminuyendo el consumo unitario medido, ampliando el volumen de almacenamiento y/o adicionando fuentes alternativas de abastecimiento (pozos y desaladoras), cuya implementación toma mayor tiempo, mientras que las medidas para mejorar la “Capacidad para gestionar las Emergencias” pueden implementarse rápidamente con acciones que adopten los prestadores para incrementar los parámetros que intervienen en su cálculo y por ende del Indicador. Cabe señalar que en el Perú, el Reglamento General de Tarifas de los Servicios de Saneamiento, aprobado por SUNASS considera desde hace años que, en caso de declaratoria de estado de emergencia por la autoridad competente del ámbito nacional, las empresas prestadoras están autorizadas para hacer uso excepcional de los recursos del fondo de inversiones y reservas (recientemente, a fines del 2023, la Ley del Servicio Universal de Agua Potable y Saneamiento recogió la misma disposición) y que aún en los casos donde no exista declaratoria de emergencia pero haya necesidad de utilizar los recursos, los prestadores pueden solicitar la autorización de uso de fondos y reservas a la SUNASS de forma sustentada.

A continuación, se comentan algunas sugerencias o ideas de cómo mejorar la seguridad de abastecimiento de agua en las empresas prestadoras, relacionadas al aspecto de “Capacidad para gestionar las Emergencias”.



Implementación de depósitos de emergencia (bladders)

Al revisar los planes de contingencia de las empresas prestadoras, se aprecia que típicamente consideran como abastecimiento alternativo (además de identificar algunos puntos de abastecimiento de agua en emergencias) el uso de camiones cisterna. Sin embargo, al cruzar con la información de la autoridad de salud encargada de otorgar las autorizaciones sanitarias para camiones cisternas (Dirección General de Saneamiento Ambiental - DIGESA), se aprecia que el número de camiones cisterna autorizados por región es significativamente insuficiente. Considerando que para la mayoría de las empresas prestadoras sería difícil adquirir y mantener un número adecuado de camiones cisterna acorde a su número de conexiones domiciliarias, una alternativa adecuada sería la adquisición de depósitos de emergencia (“bladders”). Son bolsas flexibles cerradas de membranas de PVC con protección UV que pueden almacenar desde 5 hasta 1,000 m³ de agua. Su traslado y almacenamiento son fáciles y económicos. Al realizar una estimación a escala nacional, se requerirían del orden de 600 bladders de 100m³ para atender el 20% de la demanda diaria de todas las EP.

Priorización de financiamiento a las EPS de menor índice

El índice ISAA que anualmente calcula SUNASS para las 50 empresas prestadoras que operan en el Perú puede ser aprovechado como importante herramienta para priorizar los escasos recursos nacionales y para brindar asistencia técnica y/o financiera a las empresas prestadoras que presentan menores valores del ISAA (mayor riesgo de afectación del abastecimiento de agua). El ente rector (MVCS) cuenta con una Oficina de Seguridad y Defensa Nacional, cuya responsabilidad es proponer planes, objetivos y estrategias, así como evaluar las acciones del sector en materia de Seguridad y Defensa Nacional y del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Esta oficina coordina con los órganos, programas, organismos públicos y entidades pertinentes para gestionar el riesgo de desastres y la seguridad y defensa nacional. Entre sus funciones se incluye la adquisición de materiales y equipos necesarios para la atención de grandes emergencias. Esta oficina, así como las propias empresas prestadoras podrían utilizar el indicador ISAA para priorizar el otorgamiento de financiamiento de inversiones para mitigar los casos de mayor riesgo de seguridad hídrica.



Mejorar los planes de emergencia

Un aspecto que podría mejorarse en el Índice ISAA es el cálculo del factor de “Capacidad para gestionar situaciones de emergencia”. Este factor valora si la Empresa Prestadora cuenta o no con Planes de Emergencia, y si cuenta con sistemas alternativos de suministro (camiones cisterna, tanques). Sin embargo, al revisar la información de los planes de contingencia de las empresas prestadoras, se aprecia que en la mayoría de los casos, el número de camiones cisternas que consignan para la atención de las emergencias es significativamente inferior al número requerido según la normativa de SUNASS (80 l/d por unidad de uso, que equivale a aproximadamente 16 l/h/d). En tal sentido, otros países que adopten el uso del Índice ISAA, además de valorar si los prestadores cuentan o no con planes de emergencia o contingencia y si cuentan con camiones cisterna, podrían evaluar si el número de estos es suficiente o no.

El índice ISAA contribuye con la gestión prospectiva

El ISAA puede ser una herramienta valiosa para que cada prestador identifique y evalúe los riesgos potenciales que puedan afectar el servicio, facilitando la planificación a largo plazo y la preparación ante eventos adversos. Apoya así la toma de decisiones informadas sobre políticas e inversiones y la evaluación de la efectividad de las medidas implementadas, contribuyendo a la sostenibilidad del servicio. Asimismo, el ISAA es de utilidad para el diagnóstico y la priorización de medidas del Plan de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático (PMACC) que cada prestador debe formular, facilitando la estimación de la contribución de las medidas a la resiliencia de un sistema de abastecimiento.

Alineamiento con los conceptos de gestión de riesgos de desastres (GRD)

Otro aspecto a resaltar del Índice ISAA es que en el cálculo del factor de “Capacidad para gestionar situaciones de emergencia”, también se valora si la Empresa Prestadora cuenta con un fondo constituido en un banco, separando mensualmente un porcentaje de su recaudación para “Reservas para gestión del riesgo de desastres y adaptación al Cambio Climático”, que en el caso de Perú se establece en los estudios tarifarios que SUNASS aprueba.

La asignación de esta “reserva prevista” para este fin en los estudios tarifarios de las empresas prestadoras les permiten contar con recurso valioso de disponibilidad inmediata para afrontar

situaciones de desastre como el Fenómeno del Niño y sequías, entre otros, tanto en la etapa de prevención como en la etapa reactiva después de un desastre.

A julio de 2024 el saldo disponible total de las reservas para la Gestión del Riesgo y la Adaptación al Cambio Climático ascendió a más de 100 millones de Soles (unos 26 millones de dólares). Es importante mencionar que estas reservas están disponibles para su uso ante cualquier emergencia, tal como sucedió en el 2023, cuando se dispuso mediante decreto supremo a destinar los recursos provenientes del Fondo de Inversiones y las reservas, establecidos en las Resoluciones de Consejo Directivo de la SUNASS, para financiar los costos de las actividades de operación y mantenimiento, así como las inversiones para atender y/o prevenir los daños asociados a la emergencia.

Por tanto, el índice ISAA está alineado con los conceptos de la Gestión de Riesgos de Desastres.

El indicador ISAA para la priorización de proyectos

Una priorización de financiamiento de proyectos considerando el riesgo hídrico permitiría ahorros presupuestales futuros, dado que es frecuente que, al declararse una emergencia por lluvias o sequía, el ente rector de saneamiento (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento) realiza transferencias financieras a las empresas prestadoras municipales para paliar las emergencias, es decir, se interviene de forma reactiva. En cambio, se actuaría de forma preventiva al priorizar que las empresas prestadoras de mayor riesgo hídrico puedan ejecutar proyectos que mitiguen o cambien sus riesgos, antes de que ocurran.

Por otra parte, como ya se explicó, en el caso de Perú la normativa regulatoria de saneamiento obliga a las empresas a conformar fondos y reservas de Gestión de Riesgos de Desastres y Adaptación al Cambio Climático con base a un porcentaje de la recaudación de los usuarios, y podría considerarse autorizar a que dichos fondos se inviertan en mitigar los aspectos en que la empresa prestadora tienen mayor debilidad en seguridad de abastecimiento, como aquellos que tengan menor “Capacidad para gestionar situaciones de emergencia”.

Sin embargo, existe un grupo de empresas pequeñas (menos de 15,000 conexiones) donde la magnitud de los fondos y reservas para GRD y ACC es pequeña (por ejemplo, no permitiría financiar la adquisición de un camión cisterna), y la política sectorial podría enfocarse a dirigir recursos (apoyo del Gobierno Nacional para EPS) a empresas prestadoras de este tamaño.



SUNASS incorporó el ISAA en su Sistema de Indicadores e Índices de la Gestión de los Prestadores de los Servicios de Saneamiento en junio 2023. Ahora que ya se cuenta con 3 años de datos de cálculo del ISAA, sería recomendable evaluar si se requiere algún ajuste o mejora de los parámetros que intervienen en su cálculo, en función de los resultados.

Una limitación en el Perú para que los sistemas de agua cuenten con fuentes alternativas en redundancia, que entren en operación en caso de que falle una fuente de abastecimiento habitual, es que la normativa del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones (INVIERTE.PE) considera que la infraestructura se proyecta solo para cubrir exactamente la demanda (sin excedentes), no previendo que los sistemas de abastecimiento de agua cuenten con sistemas alternativos o de emergencia, y que selecciona la alternativa de menor costo sin tomar en cuenta su vulnerabilidad o riesgo. Si se quiere mejorar la seguridad de los sistemas de abastecimiento de agua, será necesario revisar esta normativa.

CONCLUSIONES

- De acuerdo con la literatura, la cuantificación de la seguridad hídrica ha evolucionado hacia enfoques multidimensionales que integran aspectos como disponibilidad, accesibilidad, resiliencia y gobernanza, adaptándose a contextos locales y necesidades específicas. Por ello, diversos autores han desarrollado índices integrales de seguridad hídrica como pieza clave para evaluar la disponibilidad, calidad, resiliencia y gestión del abastecimiento de agua.
- El ODS 6 implícitamente incluye la necesidad de garantizar el suministro de agua potable segura durante emergencias requiriendo el acceso universal, la equidad y la calidad del servicio a través de las metas 6.1, 6.2 y 6.3, que además buscan priorizar a las poblaciones vulnerables y combinar infraestructura resistente con soluciones temporales.
- El Plan Nacional de Saneamiento 2022-2026 del Perú incluye aspectos relevantes para la sostenibilidad de los servicios de saneamiento. Un indicador cuantitativo que mide los avances en áreas clave como la gestión de riesgos y el cambio climático complementa ese enfoque.
- Desde el año 2023, SUNASS incorpora el Índice de Seguridad de Abastecimiento de Agua (ISAA) que evalúa la capacidad de los sistemas para asegurar el suministro de agua en condiciones extremas.

El índice se aplica a las 50 empresas prestadoras y sus resultados se presentan en los informes de benchmarking desde el año 2021.

- El ISAA se compone de 17 parámetros agrupados en tres áreas: Condiciones naturales, que toma en cuenta fenómenos naturales como lluvias, sequías, sismos y tsunamis; Robustez del sistema de abastecimiento, que evalúa la capacidad del sistema para mantenerse operativo ante riesgos adaptándose y respondiendo a emergencias; y Capacidad para gestionar situaciones de emergencia, referida a la habilidad del sistema para gestionar emergencias y dar servicio durante eventos extremos.
- Las mediciones del ISAA entre 2021 y 2023 tuvieron un promedio nacional de 0.49. En 2023, las empresas con mejor puntaje fueron SEDACUSCO (0.63), AGUAS DE LIMA NORTE (0.60) y EPSSMU S.A. (0.58).
- Entre 2021 y 2023, el puntaje nacional bajó un 0.26%, principalmente por problemas en la gestión de emergencias. SEDA HUÁNUCO registró la mayor caída (-32.8%), mientras que EPS RIOJA tuvo el mayor incremento (+58.7%). De acuerdo al análisis por regiones: SEDAPAL tiene la mejor condición (0.45) en la costa, EPS SIERRA CENTRAL destaca en la sierra (0.78), EMAPA SAN MARTÍN tiene el mejor índice en la selva (0.67).
- El ISAA es esencial para priorizar inversiones y fortalecer la gestión de riesgos en las EP. A su vez, es esencial para priorizar inversiones y fortalecer la gestión de riesgos en las EP. Para maximizar su impacto se requiere promover soluciones innovadoras (bladders), y ajustar los planes de emergencia para cumplir estándares regulatorios.
- El ISAA es importante para el sector de saneamiento en Perú porque contribuye a garantizar la continuidad y resiliencia del suministro de agua potable en situaciones de emergencia. Su implementación tiene varios beneficios:

Evaluación de la Resiliencia del Sistema: El ISAA permite a las empresas de saneamiento evaluar su capacidad para responder y mantener el suministro de agua en situaciones adversas, como desastres naturales. Esto es fundamental en un país con alta vulnerabilidad a eventos extremos como terremotos, huaicos e inundaciones.



Prevención y Gestión de Emergencias: Al identificar las áreas críticas de robustez, condiciones naturales y capacidad de respuesta en emergencias, el ISAA ayuda a las empresas a diseñar planes de contingencia efectivos. Esto permite reducir el impacto de interrupciones en el suministro de agua y proteger a las comunidades afectadas.

Mejora Continua y Transparencia: La información generada por el ISAA ayuda a SUNASS a monitorear el desempeño de las empresas de agua y fomentar la mejora continua. Además, permite la comparación entre empresas, lo que incentiva una mayor transparencia y rendición de cuentas, promoviendo estándares más altos en el sector.

Adaptación al Cambio Climático: Al identificar riesgos específicos y fomentar medidas preventivas, el ISAA contribuye a que el sector de saneamiento sea más adaptable frente a los desafíos climáticos, ayudando a planificar inversiones en infraestructura y tecnología para asegurar un suministro sostenible de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arreguin-Cortes, F.I., Saavedra-Horita, J.R., Rodriguez-Varela, J.M. *et al.* State level water security indices in Mexico. *Sustain Earth* **3**, 9 (2020).

<https://doi.org/10.1186/s42055-020-00031-4>

Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013, Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú.

<https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/plannacionalrecursoshidricos2013.pdf> .

Babel, M., Chapagain, K. y Shinde, V. (2023). How to measure urban water security? An introduction to the Water Security Assessment Tool (WATSAT). *APN Science Bulletin*. 13(1), 60-75.

<https://doi.org/10.30852/sb.2023.2166>

Damkjaer, S., Taylor, R. The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator. *Ambio* 46, 513–531 (2017).

<https://doi.org/10.1007/s13280-017-0912-z>

Tess Doeffinger, Jim W. Hall, Assessing water security across scales: A case study of the United States, *Applied Geography*, Volume 134, (2021), 102500, ISSN 0143-6228,

<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102500>.



Falkenmark, M. (1989). The massive water scarcity now threatening Africa - why isn't it being addressed? *Ambio*, 18(2), 112–118.

Gesualdo, G. C., Oliveira, P. T., Rodrigues, D. B. B., and Gupta, H. V.: Assessing water security in the São Paulo metropolitan region under projected climate change, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 4955–4968, <https://doi.org/10.5194/hess-23-4955-2019>, 2019.

Haxton, 2022, Assessing the resilience of Region 2 drinking water systems to natural disasters - EPA's Water Network Tool for Resilience (WNTR). Center for Environmental Solutions and Emergency Response, US EPA Office of Research and Development.

Jensen, O., Wu, H., 2018. Urban water security indicators: Development and pilot. *Environmental Science & Policy* 83, 33-45.

<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.02.003>.

Krueger, E., Rao, S., Borchardt, D., 2019. Quantifying urban water supply security under global change. *Global Environment Change* 56, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.03.009>.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), 2023, Plan Nacional de Saneamiento 2022-2026.

<https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/2586312-399-2021-vivienda>.

Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres (SINAGERD), 2021.

<https://www.gob.pe/institucion/indeci/informes-publicaciones/2370524-ley-n-29664-ley-del-sistema-nacional-de-gestion-del-riesgo-de-desastres-sinagerd>.

Sultana, R., Sultana, S., Hossain, I., Chowdhury, A. y Mahabubul, S. (2022). Water security assessment of a peri-urban area: a study in Singair Upazila of Manikganj district of Bangladesh. *Environment, Development and Sustainability*. (24), 14106-14129. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02023-6>

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), 2022, TUO del Reglamento de Calidad de la Prestación de los Servicios de Saneamiento, Resolución del Consejo Directivo N°058-2023-SUNASS-CD,

https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5250539/RESOLUCI%C3%93N%20N_%C2%BA%20058-2023-SUNASS-CD.pdf?v=1696949719

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), 2022b, Benchmarking Regulatorio de las Empresas Prestadoras 2022,

<https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2022/08/BENCHMARKING-REGULATORIO-DE-LAS-EPS-2022-DATOS-2021-F.pdf>.

Tolba, H., El-Naser, H., Ribbe, L. y Frechen, F. (2020). Assessing Water Security in Water-Scarce Cities: Applying the Integrated Urban Water Security Index (IUWSI) in Madaba, Jordan.

Environment, Development and Sustainability. (24), 14106-14129. <https://doi.org/10.3390/w12051299>

Zhu, Q., Tran, L., Wang, Y., Qi, L., Zhou, W., Yu, D. y Dai, L. (2022). A framework of freshwater services flow model into assessment on water security and quantification of transboundary flow: A case study in northeast China. *Journal of Environmental Management.* 304.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114318>

