DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Notas

Análisis estadístico y matemática aplicada en la construcción del índice de riesgo en la sostenibilidad de la prestación del servicio de agua y saneamiento, Costa Rica

Statistical analysis and applied mathematical to determine the sustainable risk in water supply and sanitation, Costa Rica

Mario Villalobos-Arias[1], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9941-956X

Silvia M. Soto-Córdoba[2], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3550-1505

Macario Pino-Gomez[3], ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8446-4723

Lilliana Gaviria-Montoya[4], ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6637-5081

[1]Mathematical Department of University of Costa Rica, researcher in CIMPA and Instituto Tecnológico de Costa Rica, mario.cr@gmail.com

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[2]Centro de investigación y Protección Ambiental (CIPA), School of Chemistry, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, ssoto@itcr.ac.cr

[3]Centro de investigación y Protección Ambiental (CIPA), School of Environmental Engineering, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, mpino@itcr.ac.cr

[4]Centro de investigación y Protección Ambiental (CIPA), School of Chemistry, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, lgaviria@itcr.ac.cr

Autora para correspondencia: Silvia M. Soto-Córdoba, ssoto@itcr.ac.cr

Resumen

En este artículo se describe el procedimiento para la construcción del índice de riesgo de la sostenibilidad en la prestación de los servicios de agua y saneamiento (IRSSAS), en las Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunales (ASADAs), aplicado para los acueductos rurales de Costa Rica. Se utilizó el análisis estadístico y matemática aplicada para construir el IRSSAS. El marco conceptual del IRSSAS considera la gestión del recurso hídrico, el saneamiento ambiental, la educación ambiental, el índice de desarrollo socioeconómico y el impacto de las amenazas naturales sobre los territorios donde se ubican los acueductos rurales. Con el uso del análisis estadístico y la

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

matemática aplicada se validó un modelo lineal generalizado para normalizar las variables, obteniéndose curvas lineales y logísticas dependiendo del tipo de datos. El IRSSAS se calculó sobre una muestra de 77 acueductos en las provincias de Puntarenas y Guanacaste, posteriormente se validó en una muestra de 21 ASADAs en la provincia de Cartago; los ámbitos del riesgo se ajustaron mediante la comparación de los resultados obtenidos por las ecuaciones matemáticas comparado con los valores reales en campo; la coincidencia del IRSSAS fue un 95 %. Se categorizaron cinco niveles de riesgo en la sostenibilidad del servicio. El 75 % de las ASADAs analizadas fueron clasificadas con valores de riesgo entre muy alto, alto y medio. El IRSSAS podría ser usado por instituciones gubernamentales, ASADAs o academia para la planificación de inversión y mejora continua de la gestión.

Palabras clave: índice de riesgo, modelo lineal generalizado, función logística, función lineal, sostenibilidad, zonas rurales.

Abstract

This paper describes the procedure for the construction of the sustainability risk index in the provision of water and sanitation services (IRSSAS), in the Administrator Associations of Aqueduct and Communal Sewerage Systems (ASADAs) in Costa Rica. Statistical analysis and applied mathematics were used for the construction of this index. The IRSSAS conceptual framework considers the water resource management, environmental sanitation, environmental education, the

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

socioeconomic development index and the impact of natural hazards on the territories where rural aqueducts are located. With the use of statistical analysis and applied mathematics, a generalized linear model was validated to normalize the variables, obtaining linear and logistic curves depending on the type of data. The IRSSAS was calculated on a sample of 77 aqueducts in the provinces of Puntarenas and Guanacaste, subsequently, it was validated in a sample of 21 ASADAs in the province of Cartago. Risk index was adjusted by comparing the results obtained by the mathematical equations compared with the real values found in the field, with the coincidence of the IRSSAS being at 95%. Five levels of risk in the sustainability of the service were categorized; 75% of the ASADAs analyzed were classified with risk values between very high, high and medium. IRSSAS could be used by government institutions, ASADAs or academia for investment planning and continuous management improvement.

Keywords: Risk index, generalized lineal model, logistic function, lineal function, sustainability, rural areas.

Recibido: 16/06/2021

Aceptado: 13/01/2022

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

Introducción

En las zonas rurales de Costa Rica, la distribución del agua es brindada por Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunales (ASADAs) y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (2016). Las ASADAs atienden un 29 % de la población del país, por tal razón su correcto funcionamiento y gestión es estratégico. Son diversas las dificultades que presentan las ASADAs en la prestación del servicio, entre las que se pueden citar aspectos operativos, comerciales, financieros, técnicos, e incluso de disponibilidad y de calidad del recurso que utilizan (Suárez-Serrano *et al*., 2019).

La vulnerabilidad de los sistemas de acueductos rurales en Costa Rica ha sido analizada considerando las características de la calidad del agua proveniente de las nacientes y las zonas de amortiguamiento (Navarro-Garro, Araya-Rodríguez, Pérez-Murillo, Moreira-Segura, & Estrada-Ugalde, 2013); las propiedades físico químicas de sus aguas (Bolaños-Alfaro, Cordero-Castro, & Segura-Araya, 2017); las características de los sistemas de desinfección (Baltodano-Obando, 2017); aspectos financieros y de gestión (González-Pérez & Jiménez, 2013), y las infraestructuras de conducción y desinfección . La mayoría de las ASADAs en Costa Rica son muy pequeñas, con menos de 300

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

abonados (Pino-Gómez, Soto-Córdoba, & Gaviria-Montoya, 2021), lo que provoca dificultades para alcanzar sus puntos de equilibrio financieros.

La información generada en el país no ha sido cruzada o registrada en forma simultánea, por lo que muchos de los datos no son útiles en la toma de decisiones por parte de los entes rectores, operadores y administradores de acueductos.

Los instrumentos de control gubernamental contemplan diversos aspectos operativos, financieros, de infraestructura y calidad, pero son difíciles de completar y requieren un nivel de comprensión técnica y operativa generalmente no encontrado en el personal técnico de las ASADAs. El país carece de índices de tercera generación que permitan predecir la sostenibilidad de la prestación del servicio de agua y saneamiento (PSAS).

Por su parte, la herramienta denominada "Gestión Integral del Riesgo en las ASADAs" (GIRA), diseñada por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), en conjunto con el Programa Naciones Unidas para el Desarrollo "Pretende facilitar la identificación, evaluación y administración frente a los riesgos de desastre en los sistemas de agua potable y saneamiento por parte de las y los gestores comunitarios del agua. Además de desarrollar los procedimientos para prevenir y mitigar estos riesgos, dar respuesta a las emergencias y recuperarse de los posibles impactos" (PNUD, 2019).

El sexto objetivo del desarrollo sostenible, agenda 2030, prioriza las inversiones en agua y saneamiento (ODS, 2015). Adicionalmente, la

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

pandemia de la COVID-19 ha puesto de manifiesto la importancia vital del saneamiento, la higiene y un acceso adecuado a agua limpia para prevenir y contener las enfermedades.

Para abordar en forma efectiva el sexto objetivo del desarrollo sostenible, diversos autores han enfocado sus esfuerzos en la construcción de modelos para adaptar los conceptos de ciclo de vida (McConville & Mihelcic, 2007), modelos comunales (Carter, Tyrrel, & Howsam, 1999) y desarrollo de indicadores (Balkema, Preisig, Otterpohl, & Lambert, 2002), entre otros.

El desarrollo sostenible es un concepto que podría ser interpretado según el observador, por tal razón es necesario contar con índices de riesgo para garantizar la PSAS. En general, los índices son una medida ajustada a la realidad de cada país y permiten llevar el control sobre los activos ambientales.

Los índices de sostenibilidad ambiental posibilitan cuantificar el nivel de responsabilidad tanto de una persona como de una organización o comunidad.

Los índices utilizados en Costa Rica y en Latinoamérica "han respondido a dinámicas ambientales que en algunas ocasiones pueden ser muy complejas de manejar", según lo indicado por Quiroga (2009). A la fecha, en Costa Rica, aún no se disponen de índices de desarrollo sostenible de tercera generación.

Existen numerosos modelos conceptuales de tipo causa-efecto en el contexto de la evaluación ambiental basada en indicadores, Vázquez-

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Valencia y García-Almada (2018) desarrollaron indicadores tipo presión-estado-respuesta (PER) y fuerzas conductoras-presión-estado-impacto-respuesta (FPEIR) en el análisis de sustentabilidad del municipio de Cihuatlán, México. Romanelli y Massone (2016) aplican esta metodología para determinar la calidad de lagos someros pampeanos de Argentina:

> "La metodología PER tiene una base lógica, las actividades humanas ejercen presiones sobre diversos atributos del medio biofísico (estado), alterándolos en mayor o menor medida. La sociedad en su conjunto identifica estas variaciones y puede decidir (objetivos de política), la adopción de medidas (respuestas) que tratarían de corregir o prevenir las tendencias negativas detectadas. Estas medidas se dirigen con carácter cautelar contra los mismos mecanismos de presión, o bien, con carácter corrector, directamente sobre los factores afectados del medio". Niemeijer y De-Groot (2008).

Dickin, Bisung, Nansi y Charles (2021) desarrollaron un indicador específico para el empoderamiento de comunidades en relación con el agua, saneamiento e higiene; por su parte, Andrade-de-Costa, Soares-de-Azevedo, Dos-Santos y Dos-Santos-Facchetti-Vinhaes-Assumpção (2020) aplican metodologías estadísticas para el aseguramiento de la calidad del agua.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Las definiciones de variables y manejo estadístico de los datos han sido ampliamente definidos por la UN (1984), y los modelos matemáticos utilizados para transformar las dimensiones hasta datos adimensionales se muestran en la metodología de este artículo.

Con el objetivo de colaborar en los procesos de gestión del recurso hídrico en las ASADAs, se propuso la construcción de un índice de tercera generación para medir los riesgos de la PSAS y mitigar los impactos asociados al cambio de clima, además de contribuir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ODS, 2015). Con esto se pretende apoyar los procesos de planificación del sector de PSAS. La construcción de este índice consideró aspectos técnicos, financieros, sociales, ambientales y el impacto de las amenazas naturales.

Se propone la construcción de un índice cuantitativo para determinar el riesgo PSAS en zonas rurales de Costa Rica, cuyo acrónimo es IRSSAS. Fue diseñado para ser accesible, aplicable, confiable, disponible, observable, relevante, representativo, válido y verificable de acuerdo con una metodología científica rigurosa.

El IRSSAS está concebido como un indicador sistémico que combina la dimensión física-biológica, social, económica y política, y se construyó utilizando como base las herramientas usadas en la huella ecológica (Rees & Wackernagel, 1996) y huella de agua (Hoekstra & Chapagain, 2007).

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

Check for updates

Materiales y métodos

Esta investigación se clasifica como científica aplicada. La información se obtuvo de registros proporcionados por AyA, provenientes de ASADAs ubicadas en las provincias de Guanacaste, Puntarenas, además de visitas de campo a las ASADAs de la provincia de Cartago. Los mismos se recolectaron entre los años 2017 y 2019. Se recopilaron las respuestas que brindaron 98 ASADAs. El total de datos recolectados fue de 2 850.

La metodología que se aplicó tiene como objetivo obtener las ecuaciones matemáticas que normalicen las respuestas correspondientes a los indicadores que componen el índice IRSSAS. Dicho índice predice y clasifica el riesgo al que se enfrenta la PSAS en áreas rurales de Costa Rica.

El ajuste de las ecuaciones se realiza utilizando los modelos lineales generalizados, los cuales se van construyendo según lo mostrado en la Figura 1, la cual resume la metodología utilizada.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

Check for updates

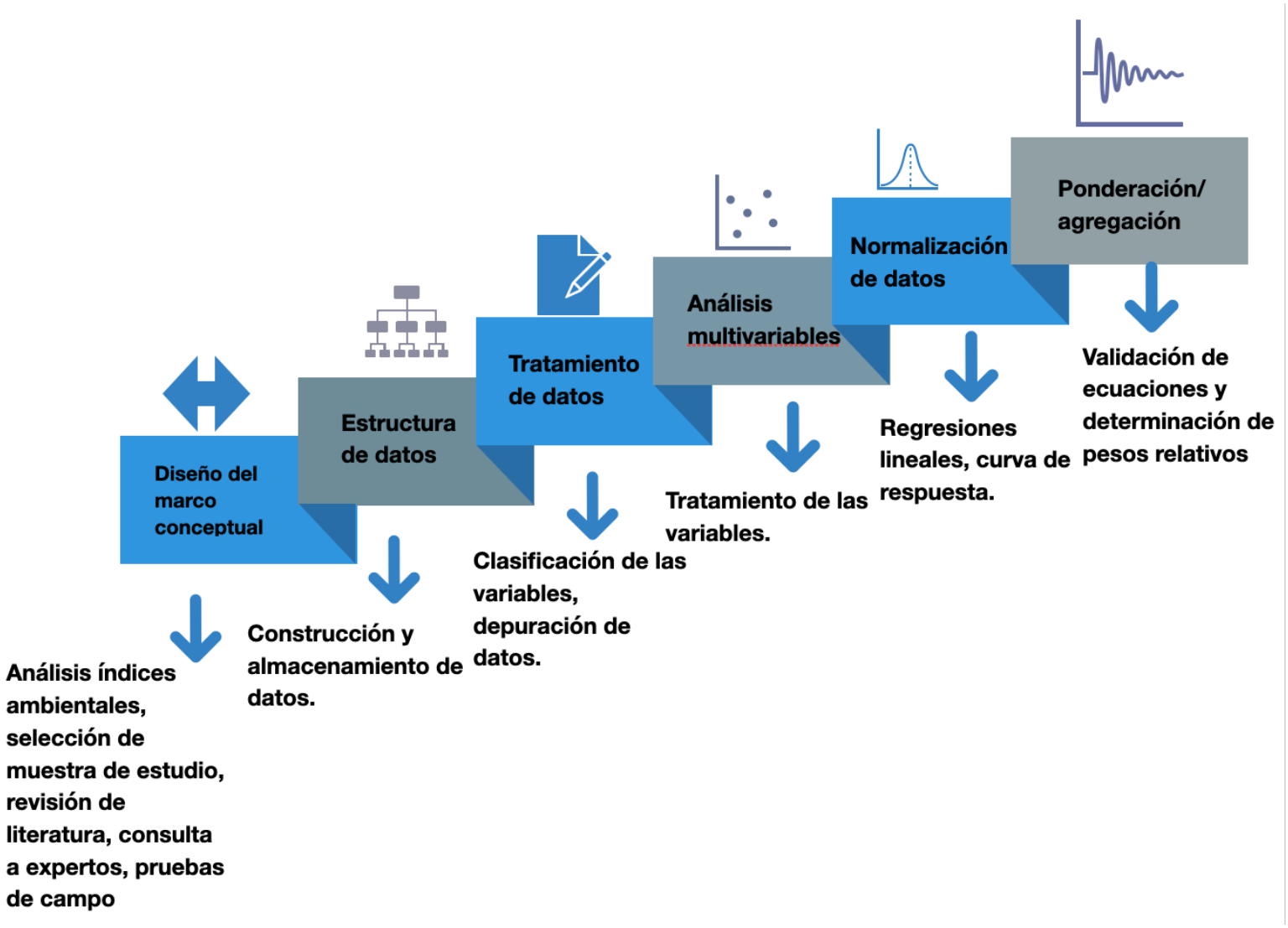

Figura 1. Resumen gráfico de la metodología de investigación. Fuente propia.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

Check for updates

Diseño del marco conceptual

Los resultados del diseño del marco conceptual teórico del IRSSAS se presentan en Pino-Gomez *et al*. (2021).

La estructura de los datos se construyó con la información generada en investigaciones previas, en el tema de bases de datos de las ASADAs (Soto-Córdoba, Gaviria-Montoya, & Pino-Gómez, 2016a), gestión de las aguas residuales (Soto-Córdoba, Pino-Gómez, & Gaviria-Montoya, 2016b), y de la sostenibilidad del servicio de agua potable y saneamiento (Soto-Córdoba, Gaviria-Montoya, & Pino-Gómez, 2019).

Estructura de datos

El IRSSAS está conformado por cinco componentes y 12 subcomponentes, como se muestra en la Figura 2.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

Check for updates

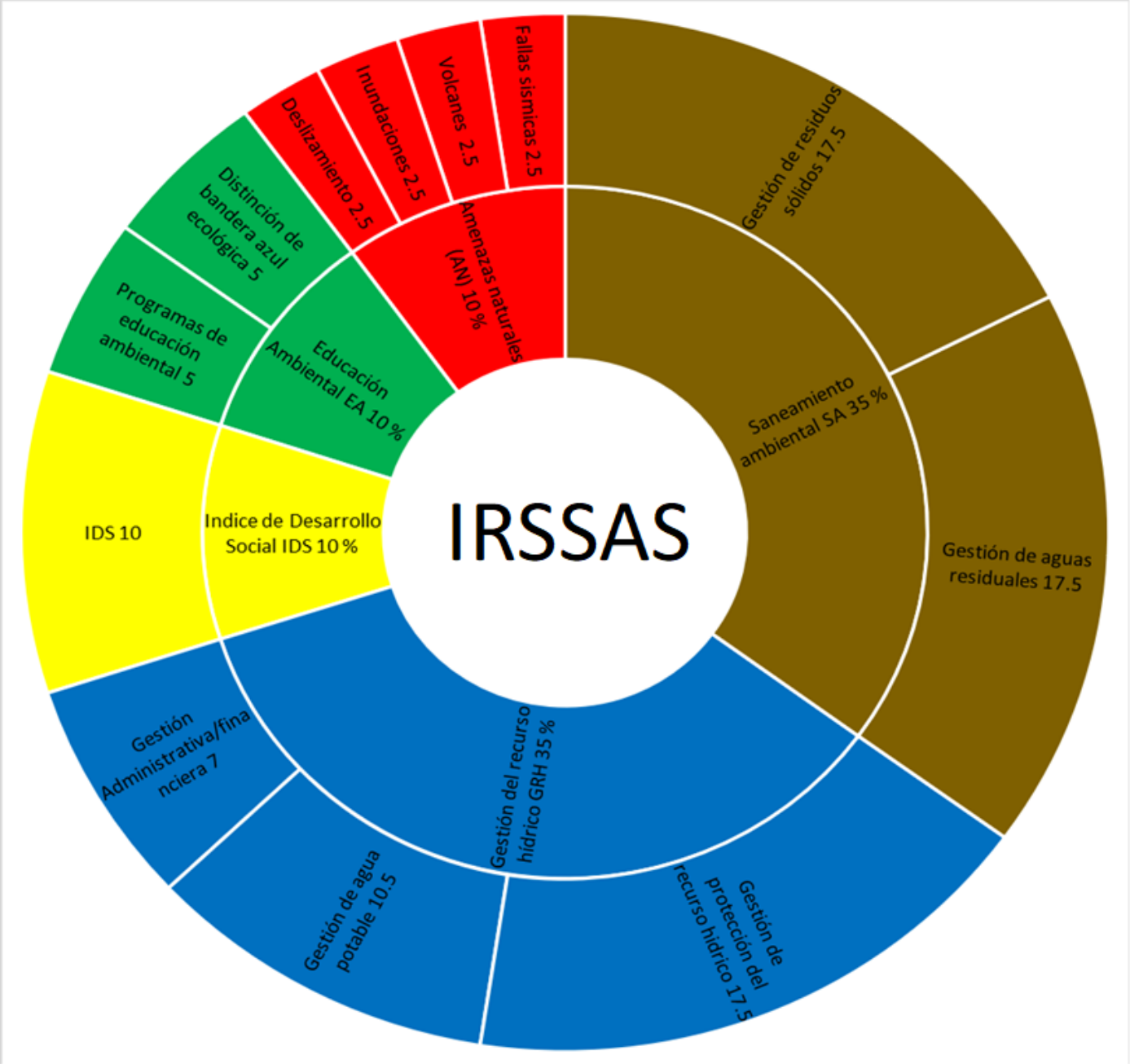

Figura 2. Conceptualización del modelo de sustentabilidad de PSAS en los acueductos rurales. Pino-Gomez *et al* (2021).

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Los porcentajes asociados con cada componente y subcomponente fueron previamente definidos por expertos; sobre esta estructura de datos se hicieron los respectivos cálculos.

En total se seleccionaron 30 preguntas que permiten calcular el riesgo en la sostenibilidad la PSAS, a las cuales se denominaron indicadores, y se distribuyen entre los componentes y subcomponentes.

Tratamiento de datos

A cada uno de los indicadores se le realizó una depuración individual de los datos en la hoja de Excel, para identificar si existían inconsistencias y si, además, aportaban valor significativo al IRSSAS. Los criterios utilizados para dicha depuración fueron los siguientes: datos completos, resultados con diversidad, criterio de expertos, detectar patrones, detectar errores, valores inusuales o fuera de ámbito. Después de la depuración de los datos se hizo un análisis lógico matemático.

Las respuestas analizadas para cada indicador corresponden a variables independientes del tipo lógicas, cualitativas y cuantitativas, con diferentes unidades de medición que después se transformaron usando

© 2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

ecuaciones matemáticas, a fin de contar con una sumatoria adimensional para el cálculo final del índice de riesgo de la sostenibilidad en la PSAS.

Análisis multivariable

Las respuestas a esos indicadores (también denominados variables) se analizaron para normalizar los ámbitos de respuesta. El fin último es poder sumar dichas respuestas de forma adimensional para obtener el índice.

A todas las respuestas se les hizo un análisis de distribución de frecuencias, para normalizar los resultados.

Los procesos para normalizar los datos dependían de su comportamiento matemático.

Los indicadores con respuestas lógica (sí, no) se analizaron utilizando una primera transformación numérica, asignándole un valor 0 a la respuesta "no" y un valor de 1 a la respuesta "sí". Usando este criterio, la función matemática se aplica según el aporte de la variable al riesgo; a aquellas variables que lo incrementan se les asigna una función lineal creciente; en caso contrario, la función es decreciente.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Las variables construidas a partir de respuestas numéricas o cuantitativas, como porcentajes (%), aforos (metros cúbicos) o flujo de caja ($), se agrupan en un análisis preliminar para identificar la naturaleza de las mismas. Posteriormente, los datos se transformaron para ser representados como una función logística.

Los gráficos son una herramienta usada para explorar patrones de datos, que brindan una gran cantidad de información de forma clara, concisa y rápida, además de esclarecer relaciones complejas en los datos.

Los gráficos utilizados en este análisis multivariable fueron:

- Histograma.
- Gráficos de caja (Boxplot).
- Dispersión de datos.
- Relación *x*-*y*.

Para cada variable se define un peso en el índice matemático y una curva de respuesta. Con la metodología aplicada se determinaron los pesos relativos de cada uno de los indicadores establecidos para calcular dicho índice de cada ASADA. El peso se estimó a partir de la experiencia de los investigadores del proyecto IRSSAS. Por su parte, la curva de respuesta se construye a partir de la opinión de los especialistas en la materia, según los rangos teóricos-prácticos establecidos por ellos, cotejados con los rangos observados en los datos de campo.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Normalización de datos

Para determinar los parámetros de las curvas de normalización de las variables se transformaron los valores ubicados entre 0 y 1 hasta sus respectivas ecuaciones lineales. En los otros tipos de respuestas, como las que provenían de ámbitos o porcentajes, se utilizaron regresiones logísticas.

Para tal fin se aplicaron dos tipos de funciones para normalizar las respuestas, que son las siguientes: logística (creciente o decreciente) y modelo lineal simple (creciente o decreciente), ambas se muestran en la Figura 3 junto con las ecuaciones respectivas.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

Check for updates

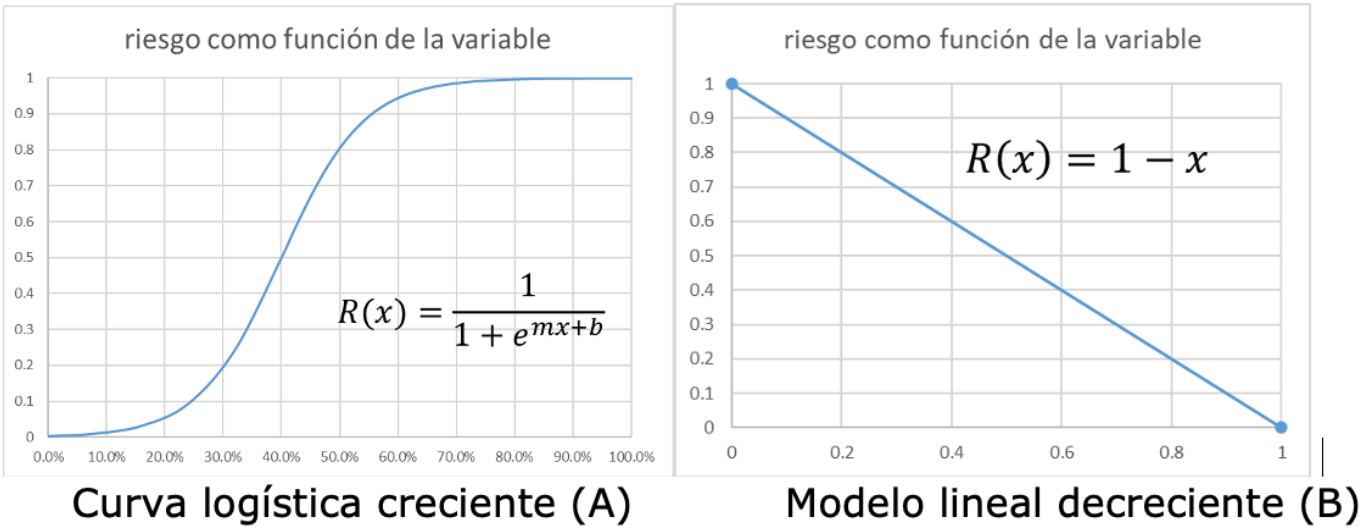

Figura 3. Representación de curvas usadas para normalizar datos.

Ponderación y agregación

Las ecuaciones matemáticas resultantes se validaron mediante su comparación contra los resultados de campo de evaluaciones *in situ* de especialistas de la sostenibilidad de los PSAS, logrando con esto categorizar el valor del IRSSAS en 21 ASADAs de la provincia de Cartago. Posteriormente se ajustaron las escalas de las respuestas de las ecuaciones matemáticas y se optimizaron las mismas para que respondieran a la realidad planteada. Las escalas se asociaron con

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

conceptos teóricos del riesgo en la sostenibilidad en la PSAS en riesgo muy alto, alto, medio bajo y muy bajo.

De acuerdo con la estructura diseñada para el IRSSAS (Figura 2), el riesgo en la sostenibilidad de PSAS se calcula a partir de la suma ponderada descrita en la Ecuación (1):

$$Índice\ IRSSAS = \sum_{i=1}^{30} p_i\, f_i(x_i) \qquad (1)$$

El IRSSAS es la sumatoria de las transformaciones por medio de funciones de diversos tipos adecuadas según los componentes y subcomponentes de la matriz de riesgo en la sostenibilidad de PSAS (logísticas crecientes o decrecientes, lineales crecientes o decrecientes) donde:

- p_i es el peso relativo del indicador *i*.
- f_i es la curva de respuesta que corresponde al indicador *i*, esta función tiene dominio en los valores de la variable *xi*.
- x_i es el valor del indicador *i* que se quiere evaluar.

Es decir, para cada valor de los indicadores x_1, x_2,..., x_{30} al aplicar la Ecuación (1) se obtiene el valor del índice entre 0 y 100 %, donde 100 % significa el valor máximo de riesgo que puede obtener la ASADA y 0 % el riesgo muy bajo de la sostenibilidad de la PSAS.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Para las funciones f_i se utilizó la función determinada para cada variable de acuerdo con el criterio de los expertos y después del análisis matemático.

A su vez, dichos componentes se subdividen en ocho subcomponentes con una contribución porcentual de impacto secundario, que también fue determinado por los expertos. Los indicadores o variables generan un impacto relativo terciario, que es el porcentaje de aporte de cada uno al IRSSAS.

Con las contribuciones porcentuales de los componentes, subcomponentes y de indicadores se produce el peso del indicador *pi*, que se calcula como el producto de los porcentajes de contribución, como se muestra en la Ecuación (2):

$$pi = \%CCi * \%CSi * \%CIi \quad (2)$$

Donde:

$\%CC_i$ es el porcentaje de contribución del componente *i*.

$\%CS_i$ el porcentaje de contribución del subcomponente *i*.

$\%CI_i$ es el porcentaje de contribución del indicador *i*.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

Check for updates

Contribución del impacto de los componentes y subcomponentes

La determinación del impacto primario y el secundario se muestra en la Tabla 1. Los porcentajes asignados corresponden a criterios de expertos.

Tabla 1. Distribución porcentual de los componentes y subcomponentes en la ecuación del IRSSAS.

Componentes (primarios)	Subcomponentes (secundarios)
Saneamiento 35 %	Agua residual 50 %; residuos sólidos 50 %
Recurso hídrico 35 %	Gestión del recurso hídrico 30 % Calidad del agua potable 20 % Gestión administrativa comercial 10 %
Desarrollo social 10 %	Índice de desarrollo social 100 %
Educación ambiental 10 %	Capacitaciones 50 % Galardones y reconocimientos 50 %
Eventos naturales 10 %	Inundación 25 %; deslizamiento 25 %; volcánicos 25 %; sismos 25 %

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

A cada uno de los subcomponentes se le calcula su respectivo impacto secundario utilizando la Ecuación (3):

$$Impacto\ secundario_k = \sum_{i=1}^{m_k} p_i\, f_i(x_i) \quad (3)$$

Donde *k* representa cada uno de los grupos de indicadores que conforman cada subcomponente del índice; la suma se hace sobre las variables del grupo respectivo. Desde *i* = 1 hasta 12.

El peso relativo de cada componente se calcula con la Ecuación (4):

$$Peso\ relativo\ componente = \sum_{k=1}^{5} pI_k * Impacto\ Secundario_k \quad (4)$$

Donde p*Ik* es el peso relativo de *p*, de contribución terciaria del subíndice *Ik.*

Con el valor de estos subíndices se genera un gráfico tipo araña donde se despliegan los valores de los componentes para cada ASADA.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Validación del resultado del IRSSAS

Los resultados numéricos de la aplicación del IRSSAS calculados a partir de datos provenientes de 77 ASADAs se validaron posteriormente mediante visitas de campo a 21 acueductos, donde mediante criterio de expertos se ajustaron los ámbitos de los resultados numéricos. El ajuste de los ámbitos asociados con los IRSSAS se realizó usando criterios técnicos y estadísticos, de forma que los resultados numéricos pudieran expresarse en términos lógicos de riesgo en la sostenibilidad de la PSAS.

Resultados y discusión

Durante la investigación previa se identificaron los componentes y subcomponentes que se evalúan por medio de 30 indicadores. Los resultados se presentan en la Tabla 2. Adicionalmente, se adjuntan los resultados del cálculo de los diferentes pesos generados en las diversas ecuaciones para cada componente y subcomponente e indicador, además de la clasificación del tipo de variable y función que describe su comportamiento matemáticamente.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tabla 2. Composición de los indicadores del IRSSAS según componentes y subcomponentes.

Componente Impacto primario % contribución	Subcomponente Impacto secundario % de contribución	Impacto terciario % contribución	Peso indicador %	Indicador	Tipo de variable	Función aplicada *f(x)*
Saneamiento 35	Gestión AR 50	20	3.5	¿Existen sistemas de tratamiento individual de aguas negras en la comunidad?	Lógica (sí, no)	LiD
		20	3.5	¿Existe presencia de aguas grises en los caños de recolección de agua lluvia?	Lógica (sí, no)	LiC
		20	3.5	¿La población cuenta con alcantarillado pluvial?	Lógica (sí, no)	LiD
		20	3.5	¿La población tiene planta de tratamiento de aguas residuales?	Lógica (sí, no)	LiD
		20	3.5	Porcentaje (%) de liquidez para invertir en mejoras del acueducto	Cuantitativa	LD
	Gestión de RS 50	20	3.5	% cobertura de recolección de residuos sólidos no valorizables	Cuantitativa	LD
		20	3.5	¿Existe recolección de residuos sólidos valorizables?	Lógica (sí, no)	LiD
		20	3.5	Producción per cápita de residuos sólidos (kg/persona/día)	Cuantitativa	LiD
		20	3.5	Inversión anual en Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) por persona por año en el cantón ($/persona/año)	Cuantitativa	LiC
		20	3.5	Inversión en la limpieza de vías y áreas comunes por persona en cada cantón ($/persona/año)	Cuantitativa	LiD

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Componente Impacto primario % contribución	Subcomponente Impacto secundario % de contribución	Impacto terciario % contribución	Peso indicador %	Indicador	Tipo de variable	Función aplicada *f(x)*
Gestión Recurso Hídrico 35	Gestión Protección Recurso Hídrico 50	14,29	2.5	¿La ubicación de la captación está en área protegida o en zona de conservación?	Lógica (sí, no)	LiD
		14,29	2.5	¿Está demarcada la zona de protección legalmente?	Lógica (sí, no)	LiD
		14,29	2.5	¿Se cuenta con información del balance hídrico?	Lógica (sí, no)	LiD
		14,29	2.5	Consumo promedio de agua de la comunidad expresado en unidades de litros por persona por día (l/persona/día)	Cuantitativa	LC
		14,29	2.5	¿La ASADA posee plan de atención integral de riesgos?	Lógica (sí, no)	LiD
		14,29	2.5	¿Cuentan con programas para adaptación al cambio climático?	Lógica (sí, no)	LiD
		14,29	2.5	¿Posee registros de aforos de las fuentes de abastecimiento?	Lógica (sí, no)	LiD
	Calidad Agua Potable 30	25	2.63	¿Se diagnóstica el riesgo en los componentes del acueducto mediante la herramienta SERSA?	Lógica (sí, no)	LiD
		25	2.63	¿La ASADA posee sistema de desinfección?	Lógica (sí, no)	LiD
		25	2.63	¿Posee planta potabilizadora?	Lógica (sí, no)	LiD
		25	2.63	¿Posee la ASADA sello de calidad sanitaria?	Lógica (sí, no)	LiD

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Componente Impacto primario % contribución	Subcomponente Impacto secundario % de contribución	Impacto terciario % contribución	Peso indicador %	Indicador	Tipo de variable	Función aplicada *f*(*x*)
	Gestión Administrativa / Financiera 20	50	3.50	% de morosidad en el pago del servicio de agua	Cuantitativa	LC
		50	3.50	% agua no contabilizada	Cuantitativa	LC
Desarrollo Social 10	Índice de Desarrollo Social 100	100	10	Índice de Desarrollo Social (IDS) del MIDEPLAN	Cuantitativa	LD
Educación 10	Capacitaciones 100	50	5	¿Posee distinción de bandera azul ecológica (en la comunidad, microcuencas y municipalidades)?	Lógica (sí, no)	LiD
		50	5	¿Los operadores han desarrollado programas de educación ambiental para la comunidad y los imparten regularmente (una vez al año)? Sí/No	Lógica (sí, no)	LiD
Riesgo por Eventos Naturales 10	Eventos Naturales	25	2.5	¿Posee su acueducto riesgo de inundación?	Lógica (sí, no)	LiC
		25	2.5	¿Posee su acueducto riesgo de deslizamientos?	Lógica (sí, no)	LiC
		25	2.5	¿Posee su acueducto riesgos volcánicos?	Lógica (sí, no)	LiC
		25	2.5	¿Su acueducto está ubicado en zonas sísmicas?	Lógica (sí, no)	LiC

LC = logística creciente

LD = logística decreciente

LiC = lineal creciente

LiD = lineal decreciente.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Se generaron para cada uno de los indicadores las respectivas ecuaciones matemáticas, según lo indicado en el apartado de normalización de datos. Las respuestas dicotómicas (sí o no) se representaron con funciones logísticas lineales crecientes o decrecientes, cuya ecuación general es del tipo $R(x) = 1 - x$ o $R(x) = 1 + x$.

Los valores numéricos asociados con modelos logísticos del tipo $R(x) = \frac{1}{1+e^{mx+b}}$ o $R(x) = \frac{1}{1-e^{mx+b}}$ se muestran en la Tabla 3.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Tabla 3. Valores de *m* y *b* determinados para curvas logísticas decrecientes o crecientes.

Indicador	Valor *m*	Valor *b*
Porcentaje (%) liquidez inversión mejoras del acueducto	9.40549	-4.73027489
% recolección de residuos sólidos no valorizables	0.0946055	-4.7302748
Inversión (GIRS) ($/persona/año)	0.01980009	-5.52212699
Inversión LVAC ($/persona/año)	0.00202726	-4.66269953
Índice de Desarrollo Social (IDS)	0.141908247	-7.09541233
Producción per cápita residuos sólidos (kg/persona/día)	-7.09541233	5.67632986
Consumo promedio de agua (l/persona/día)	-0.0567633	14.1908247
% de morosidad en el pago del servicio de agua	-14.1908247	4.2572474
% agua no contabilizada	-14.1908247	4.2572474

GIRS: gestión integral de residuos sólidos

LVAC: limpieza de vías y áreas comunes.

Fuente: elaboración propia.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En la Tabla 4 se resume la clasificación del riesgo en función de los ámbitos calculados para el IRSSAS. Entre mayor sea el valor obtenido del IRSSAS, mayor será el nivel de riesgo de la sostenibilidad de la PSAS. El nivel de riesgo se representa con un color, siendo el rojo el de mayor riesgo, y el color azul el riesgo más bajo; también se muestra el concepto técnico utilizado para definir el tipo de riesgo en la PSAS.

Tabla 4. Transformación de la escala numérica del IRSSAS a la escala lógica de riesgo.

Riesgo	% IRSSAS	Color asignado	Significado
Muy bajo	< 47	Azul	La PSAS es sostenible
Bajo	47-57	Celeste	Debe existir estricta vigilancia en la PSAS e implementar mejoras en los subcomponentes
Medio	58-67	Verde	La PSAS es regular. Prestar atención especial a los subcomponentes con mayor porcentaje de riesgo e implementar medidas correctivas a la brevedad
Alto	68-77	Amarillo	Fragilidad de la PSAS
Muy alto	> 77	Rojo	La PSAS es insostenible en el tiempo. Adoptar medidas urgentes y reducir el riesgo

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Los ámbitos previamente calculados para definir el riesgo en la sostenibilidad de la PSAS se ajustaron a la realidad de los acueductos, por tanto, es posible afirmar que la herramienta podría ser utilizada en la planificación y toma de decisiones.

En la Figura 4 se muestran los resultados la aplicación del IRSSAS en los 98 acueductos (77 de Guanacaste y Puntarenas, y 21 de Cartago). Como se observa, el 75 % se clasificaron con valores de riesgo en la sostenibilidad del PSAS entre muy alto, alto y medio, situación que es preocupante para la sostenibilidad de las ASADAs. En Costa Rica, la distribución de agua potable actualmente es exitosa, sin embargo, los resultados obtenidos a partir de la herramienta muestran una importante vulnerabilidad de cara al cambio climático, aunado a la crisis fiscal del país y los efectos de la COVID-19.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

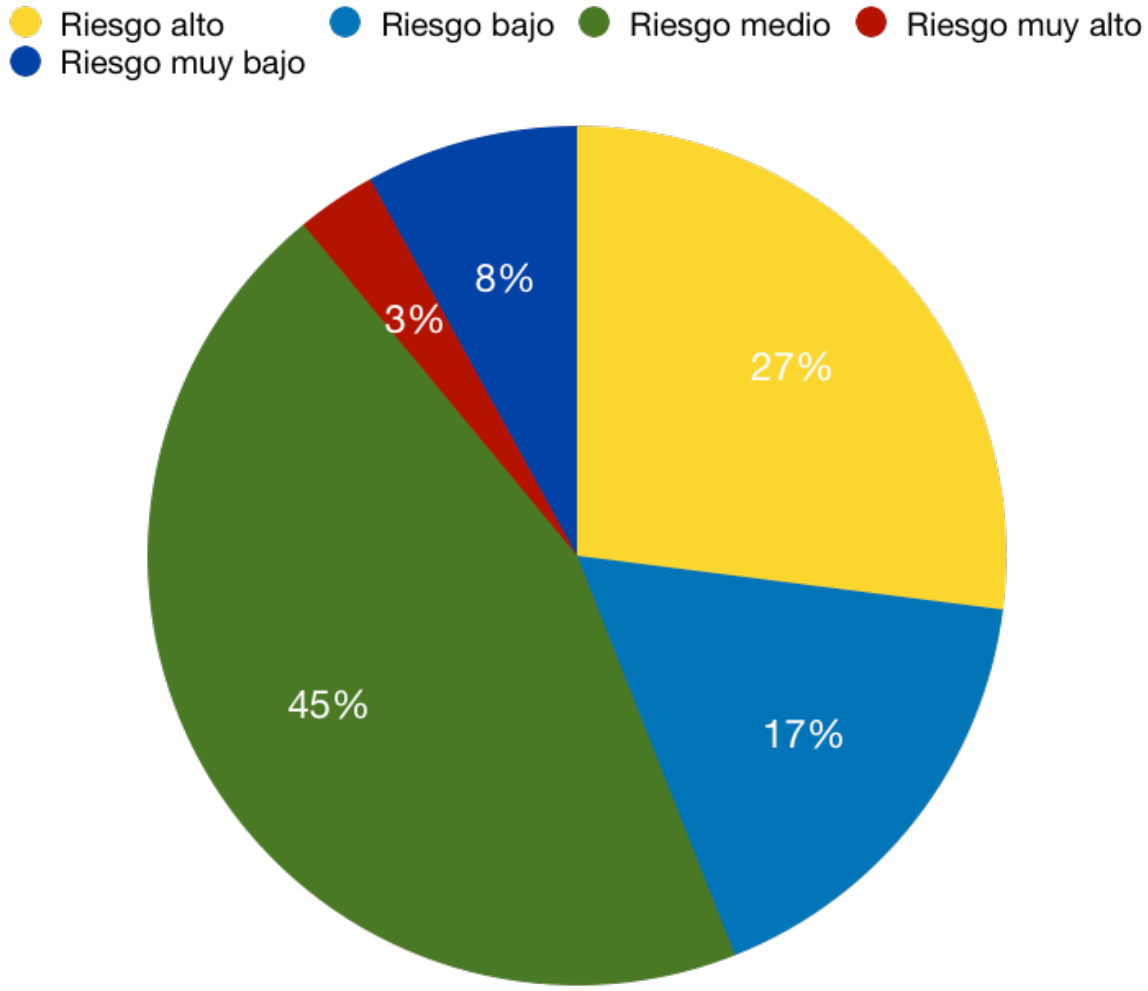

Figura 4. Clasificación de las 98 ASADAs según su nivel de riesgo en la sostenibilidad del PSAS (IRSSAS).

En la Figura 5 se muestra un ejemplo del resultado de la representación del IRSSAS en formato de gráfico de araña, donde se evidencian los resultados parciales de cada uno de los componentes del IRSSAS en una ASADA.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

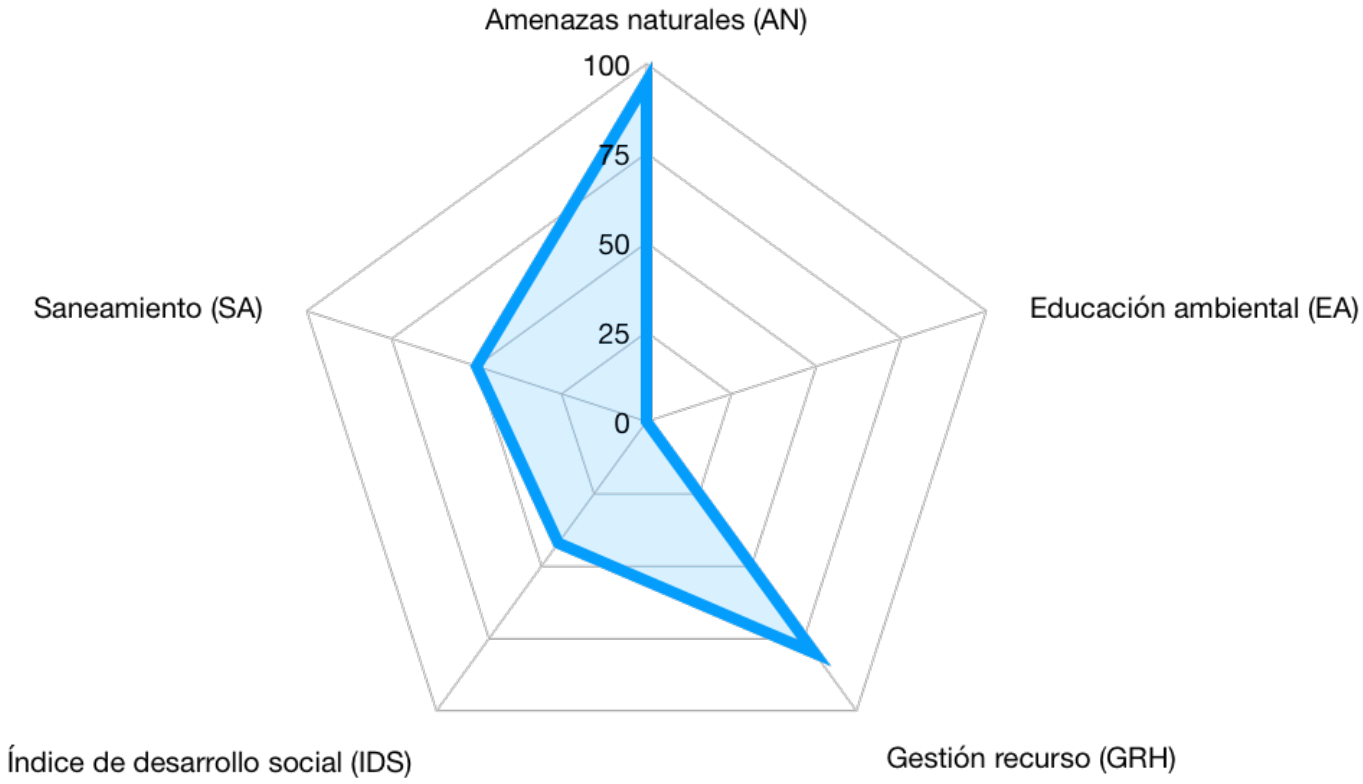

Figura 5. Ejemplo de los resultados de aplicación del IRSSAS en una ASADA. Fuente propia.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, la PSAS se enfrenta a varios retos importantes debido su vulnerabilidad ante el escenario del cambio climático, el aumento de población, la disminución de la inversión en el sector hídrico, además de la falta de apoyo técnico por parte de las instituciones rectoras.

Las ASADAs deberían poder financiar sus inversiones para una mejora continua, sin embargo la estructura administrativa-financiera no logra alcanzar un punto de equilibrio cuando las organizaciones tienen muy pocos abonados.

La sostenibilidad no ha sido una prioridad para las ASADAs, ha privado la improvisación en la solución de problemas de operación del día a día.

Del análisis de los resultados obtenidos mediante la aplicación del índice IRSSAS se evidencia una situación negativa relacionada con la sostenibilidad de la PSAS, pues el 75 % de las ASADAs se clasifica en riesgos de medio a muy alto. Esto pone en peligro la prestación futura de los servicios de agua y saneamiento.

El escenario del cambio climático afectará la infraestructura del sector agua potable y saneamiento, modificará los caudales de agua, e

© 2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

incidirá en la planificación y sustentabilidad de la PSAS. Así, los modelos estadísticos y de matemática aplicada permitirán una mejor planificación y control, a fin de favorecer la adaptación de las comunidades y paliar los efectos del cambio climático.

El modelo matemático aplicado en esta investigación se ajustó y se validó con los datos de campo, optimizando los resultados de salida.

En el país existen muchos instrumentos de verificación que dependen de criterios de expertos o de evaluaciones en campo, el IRSSAS se constituye en un índice de tercera de generación que permite la predicción del riesgo mediante la aplicación de un cuestionario de indicadores estadísticamente validados; por tanto, los resultados no serán afectados por criterios particulares. Además, es posible comparar diferentes acueductos simultáneamente y a través del tiempo.

La ecuación del IRSSAS permite la evaluación de la PSAS en las ASADAs sin la necesidad de realizar visitas de campo por expertos de las instituciones rectoras u consultores privados, pues es un instrumento de autoevaluación que pueden completar los administradores de los acueductos. Esta característica favorece las finanzas de los acueductos; les permite tener una visión general de su nivel de riesgo para la sustentabilidad del servicio, y los empodera en la gestión del acueducto.

La construcción de un índice de tercera generación como el desarrollado en esta investigación permitirá la toma de decisiones en la planificación de la inversión en el sector de la gestión de agua potable y saneamiento en Costa Rica y países con características similares, como

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 14(4), 415-455. DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-09

son el resto de la región Centroamericana, el Caribe, y algunos otros países de renta media y baja.

Lista de acrónimos

ASADA: Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunales.

AyA: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

IRSSAS: Índice de Riesgo en la Sostenibilidad de la prestación del Servicio de agua potable y Saneamiento.

PSAS: Prestación Sostenible de Agua y Saneamiento.

MinSalud: Ministerio de Salud.

Agradecimientos

Financiamiento: proyecto 146-074 VIE TEC.

Agradecimientos: a las ASADAS que ofrecieron su información, y al AyA la colaboración en el suministro de base de datos.

Conflicto de intereses: los autores no declaran ningún conflicto de interés.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Referencias

Andrade-de-Costa, D., Soares-de-Azevedo, J. P., Dos-Santos, M. A., & Dos-Santos-Facchetti-Vinhaes-Assumpção, R. (2020). Water quality assessment based on multivariate statistics and water quality index of a strategic river in the Brazilian Atlantic forest. *Scientific Reports*, 10(1) DOI: 10.1038/s41598-020-78563-0

Balkema, A. J., Preisig, H. A., Otterpohl, R., & Lambert, F. J. D. (2002). Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. *Urban Water*, 4(2), 153-161. Recuperado de https://doi.org/10.1016/S1462-0758(02)00014-6

Baltodano-Obando, D. (2017). *Herramienta para la mejora de la gestión físico-sanitaria de 10 ASADAS de la región Pacífico Central de Costa Rica* (tesis de Licenciatura en Tecnologías Limpias). Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Recuperado de https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/13659?show=full

Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G., & Segura-Araya, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología en Marcha*, 30(4), 15-27. Recuperado de https://dx.doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Carter, R. C., Tyrrel, S. F., & Howsam, P. (1999). The impact and sustainability of community water supply and sanitation programmes in developing countries. *Water and Environment Journal*, 13, 292-296. Recuperado de https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1999.tb01050.x

Dickin, S., Bisung, E., Nansi, J., & Charles, K. (2021). Empowerment in water, sanitation and hygiene index. *World Development*, 137. DOI: 10.1016/j.worlddev.2020.105158

González-Pérez, M. F., & Jiménez, F. (2013). Gestión del agua para consumo humano de las asociaciones administradores de acueductos y alcantarillados (ASADAS) de Buenos Aires y Suerre, Área de conservación de Tortuguero, Costa Rica. *Aqua-LAC*, 5(1), 1-21.

Hoekstra, A., & Chapagain, A. (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21, 35-48. Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5591-1_3

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. (2016). *Política nacional de agua potable de Costa Rica 2017-2030*. San José, Costa Rica: Comisión Interinstitucional. Recuperado de http://www.aya.go.cr

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

McConville, J., & Mihelcic, J. (2007). Adapting life-cycle thinking tools to evaluate project sustainability in international water and sanitation development work. *Environmental Engineering Science*, 24(7), 937-948. Recuperado de http://doi.org/10.1089/ees.2006.0225

Navarro-Garro, A., Araya-Rodríguez, F., Pérez-Murillo, D. F., Moreira-Segura, C., & Estrada-Ugalde, M. (2013). Vulnerabilidad de los sistemas de acueductos rurales: cómo identificarla. *Revista Tecnología en Marcha*, 26(3), 62-73. Recuperado de https://doi.org/10.18845/tm.v26i3.1518

Niemeijer, D., & De-Groot, R. (2008). A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. *Ecological Indicators*, 8, 14-25.

ODS, Objetivos de Desarrollo Sostenible. (2015). *Objetivos y metas desarrollo sostenible agenda 2030, Naciones Unidas*. Recuperado de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

Pino-Gomez, M., Soto-Córdoba, S., & Gaviria-Montoya, L. (2021). Construcción del índice de riesgo para determinar la sostenibilidad del servicio de agua y saneamiento (IRSSAS) en distritos rurales de Costa Rica atendidos por ASADAs. *Tecnología en Marcha*, 34(3). DOI: https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5198

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2019). *Guía de trabajo para las ASADAs, enfoque de cuenca*. Recuperado de https://www.cr.undp.org/content/costarica/es/home/library/Masculinidadesytendenciasdelictivas1.html

Quiroga, M. R. (2009). *Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe, CEPAL, Santiago de Chile*. Recuperado de https://www.cepal.org/sites/default/files/courses/files/8_manual-61-cepal_formatoserie_color.pdf

Rees, W., & Wackernagel, M. (1996). Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable—And why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 16(4-6), 223-248. Recuperado de https://doi.org/10.1016/S0195-9255(96)00022-4

Romanelli, A., & Massone, H. (2016). Desarrollo de indicadores ambientales e índice de calidad de lagos someros pampeanos de Argentina con alta intervención antrópica. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(6), 123-137. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000600123&lng=es&tlng=es

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Soto-Córdoba, S. M., Gaviria-Montoya, L., & Pino-Gómez, M. (2019). Estudio de caso: disposición de las aguas residuales domésticas en zonas rurales de costa rica. *Ambiente & Sociedad*, 22, e01562. Epub August 26, 2019. Recuperado de https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20170156r2vu2019l2ao

Soto-Córdoba, S. M., Gaviria-Montoya, L., & Pino-Gómez, M. (2016a). Situación de la gestión del agua potable en las zonas rurales de la provincia de Cartago, Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(8), 67-76. Recuperado de https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2986

Soto-Córdoba, S. M., Pino-Gómez, M., & Gaviria-Montoya, L. (2016b). Build up a database to determine the management of drinking water in the Province of Cartago, Costa Rica. J*ournal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 6(4), 584-592. DOI: https://doi.org/10.2166/washdev.2016.092

Suárez-Serrano, A., Baldioceda-Garro, Á., Durán-Sanabria, G., Rojas-Conejo, J., Rojas-Cantillano, D., & Guillén-Watson, A. (2019). Seguridad hídrica: gestión del agua en comunidades rurales del Pacífico Norte de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2), 25-46. Recuperado de https://dx.doi.org/10.15359/rca.53-2.2

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

UN, United Nations. (1984). *A framework for the development of environmental statistic* (Statistical Papers Series # 78). New York: United Nations. Recuperado de http://unstats.un.org/unsd/publication/SeriesM/SeriesM_78e.pdf.

Vázquez-Valencia, R. A, & García-Almada, R M. (2018). Indicadores PER y FPEIR para el análisis de la sustentabilidad en el municipio de Cihuatlán, Jalisco, México. *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 27(53-1), 1-26. Recuperado de https://doi.org/10.20983/noesis.2018.3.1

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)