

Análisis y optimización del uso del recurso hídrico en edificios escolares de San Juan, Argentina

Analysis and optimization of water resource use in school buildings in San Juan, Argentina

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i20.343>

MARÍA CELINA MICHAUX

IRPHa-CONICET, Argentina. ORCID: 0000-0003-0347-6402
Correo electrónico: celinamichaux@faud.unsj.edu.ar

MARÍA GUILLERMINA RE

IRPHa-CONICET, Argentina. ORCID: 0000-0002-3109-7138
Correo electrónico: guillerminare@faud.unsj.edu.ar

Recepción: 24 de octubre de 2025. Aceptación: 13 de mayo de 2026.

RESUMEN

El estudio analiza el uso del recurso hídrico en dos escuelas del Área Metropolitana de San Juan y propone estrategias de mejora para reducir el consumo en un contexto árido, contribuyendo a la eficiencia hídrica. Se aplicó un enfoque mixto (cuali-cuantitativo) basado en la Metodología de Evaluación y Calificación Ambiental, estructurado en tres etapas: análisis documental de modelos de certificación de sustentabilidad para escuelas, auditorías técnicas in situ en los edificios seleccionados y formulación de propuestas de optimización, complementadas con un análisis costo-beneficio simplificado para evaluar su viabilidad económica. Los resultados evidencian un desempeño hídrico deficiente en ambas escuelas, con ausencia de monitoreo, reutilización de agua y riego eficiente, aunque se identificó un potencial de ahorro anual significativo de 4,1 millones de litros en el Colegio Central Universitario y 11,8 millones en el Colegio N.º 1 de Rawson. Asimismo, el análisis económico permitió identificar que las medidas de bajo costo y rápida implementación presentan los mejores niveles de costo-efectividad, mientras que aquellas de mayor inversión

ABSTRACT

This study analyzes water resource use in two schools in the San Juan Metropolitan Area and proposes improvement strategies to reduce consumption in an arid context, contributing to water efficiency. A mixed-methods (qualitative and quantitative) approach was applied, based on the Environmental Assessment and Rating Methodology, structured in three stages: documentary analysis of sustainability certification models for schools, on-site technical audits of the selected buildings, and formulation of optimization proposals, complemented by a simplified cost-benefit analysis to assess their economic viability. The results show poor water management performance in both schools, with a lack of monitoring, water reuse, and efficient irrigation, although significant potential for annual savings of 4.1 million liters was identified at the Central University School and 11.8 million liters at School No. 1 in Rawson. Furthermore, the economic analysis identified that low-cost, rapidly implementable measures offer the best cost-effectiveness, while those requiring greater investment acquire strategic importance due to their significant impact



adquieren un carácter estratégico por su alto impacto en el ahorro hídrico. El trabajo aporta valor al validar la Metodología de Evaluación y Calificación Ambiental como herramienta de diagnóstico, planificación y priorización de intervenciones en contextos áridos, cubriendo un vacío de estudios sobre eficiencia hídrica en escuelas. En conclusión, se demuestra que la implementación de medidas simples y económicamente viables puede generar un alto impacto en la reducción del consumo, fortaleciendo la gestión sostenible del agua y la educación ambiental escolar.

Palabras clave: edificio educativo, recurso hídrico, auditoría escolar, gestión sostenible del agua, eficiencia hídrica.

INTRODUCCIÓN

Las problemáticas vinculadas al agua constituyen uno de los principales desafíos del siglo XXI, en tanto su disponibilidad y distribución desigual afectan de manera creciente a los sistemas naturales y antrópicos (Khilchevskyi, 2020). Esta situación responde a la convergencia de factores climáticos, hidrológicos, socioeconómicos y territoriales, como el crecimiento demográfico, los cambios en los patrones de consumo y las limitaciones en la infraestructura de abastecimiento, en un contexto donde el cambio climático intensifica la variabilidad del ciclo hidrológico y la frecuencia de eventos extremos como sequías e inundaciones (UNESCO, 2024; Lai, 2020; IPCC, 2022; Naciones Unidas, 2021). En este marco, la escasez hídrica no debe entenderse únicamente como un déficit físico del recurso, sino como una condición de vulnerabilidad socioambiental resultante de la interacción entre disponibilidad, demanda y capacidad de gestión, reforzada por un sistema de retroalimentación entre agua y clima que amplifica los impactos del cambio climático y compromete tanto la cantidad como la calidad del recurso, afectando funciones ecosistémicas, productivas y de habitabilidad (Mahato et al., 2022).

En regiones áridas, como San Juan, esta situación adquiere mayor complejidad debido a

on water conservation. This work adds value by validating the Environmental Assessment and Qualification Methodology as a diagnostic, planning, and prioritization tool for interventions in arid contexts, filling a gap in studies on water efficiency in schools. In conclusion, it is demonstrated that the implementation of simple and economically viable measures can generate a significant impact on reducing consumption, strengthening sustainable water management and environmental education in schools.

Keywords: educational building, water resources, school audit, sustainable water management, water efficiency.

la dependencia del deshielo cordillerano, lo que introduce una alta variabilidad interanual y una creciente incertidumbre, requiriendo enfoques de gestión integrales que articulen dimensiones técnicas, sociales y de gobernanza para garantizar un uso eficiente y equitativo del recurso (Secretaría de Agua y Energía, 2023; Schmidt, 2022; Ballari y Cortizas, 2023).

Los edificios representan una fracción significativa del consumo de agua a nivel global, con valores entre el 25% y el 33% del total extraído, dependiendo del contexto (Flores y Ghisi, 2022). Dentro de este sector, los establecimientos educativos constituyen espacios estratégicos, no solo por su demanda hídrica asociada al uso intensivo de sus instalaciones, sino también por su rol en la formación de hábitos y prácticas sostenibles. Sin embargo, diversos estudios evidencian que muchas escuelas carecen de infraestructura adecuada para el uso eficiente del agua y presentan limitaciones en términos de monitoreo, reutilización y gestión del recurso (Antunes y Ghisi, 2020; UNICEF, 2018).

En este sentido, los edificios escolares ubicados en contextos áridos pueden ser considerados como sistemas particularmente vulnerables, debido a la combinación de condiciones climáticas restrictivas, elevada demanda y limitaciones operativas (IPCC, 2022). Esta situación los posiciona como casos relevantes para el análisis y la imple-

mentación de estrategias de eficiencia hídrica, capaces de reducir el consumo y aumentar la resiliencia frente a escenarios de escasez. Como complemento, se observa una creciente tendencia hacia la optimización del uso de los recursos hídricos en edificios educativos, impulsada tanto por la necesidad de reducir la demanda de agua potable como por el rol estratégico de las escuelas en la formación de hábitos sostenibles.

En respuesta a esto, diversas metodologías de evaluación ambiental han incorporado criterios específicos orientados al uso eficiente del agua, promoviendo la adopción de tecnologías, sistemas de reutilización y prácticas de gestión sostenible (Masía et al., 2020). En esta línea, la Metodología de Evaluación y Calificación Ambiental (MECSA), desarrollada en el ámbito de la investigación aplicada, propone un conjunto de indicadores que permiten diagnosticar el desempeño hídrico de los edificios y orientar la toma de decisiones.

Asimismo, la vulnerabilidad hídrica en regiones áridas no responde únicamente a la escasez física del recurso, sino a la interacción entre condiciones climáticas, presión sobre la demanda y limitaciones en los sistemas de gestión. Estos territorios presentan balances hídricos deficitarios, alta variabilidad interanual y una fuerte dependencia de fuentes externas como el deshielo, lo que incrementa su exposición frente al cambio climático (IPCC, 2022).

La implementación de ecotecnias, como la reutilización de aguas grises (AG) y la captación de agua de lluvia, constituye una alternativa relevante para reducir la dependencia del suministro central y mejorar la seguridad hídrica urbana, aunque su efectividad depende de su escala de aplicación, su impacto en el ciclo hidrológico local y su viabilidad económica, especialmente en edificios públicos con restricciones presupuestarias (Rodrigues et al., 2023; Ghisi y Freitas, 2024). En particular, la captación de agua pluvial (AP), si bien contribuye a disminuir la demanda de red, puede modificar los flujos de escorrentía, por lo que requiere evaluaciones contextualizadas y condiciones adecuadas de financiamiento, man-

tenimiento y respaldo institucional (Teston et al., 2024; Ogunnaike et al., 2025).

En el caso de San Juan, estas estrategias presentan un desarrollo incipiente en el sector educativo, limitándose a experiencias puntuales, aunque antecedentes nacionales e internacionales evidencian su potencial en contextos áridos, especialmente cuando se integran con políticas de gestión y monitoreo del recurso, lo que refuerza la necesidad de estudios aplicados que aborden simultáneamente su desempeño técnico, viabilidad económica e implementación institucional (Antunes y Ghisi, 2020; Campisano et al., 2017).

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el uso del recurso hídrico en dos escuelas del Área Metropolitana de San Juan (AMSJ), de distinta tipología y año de construcción, a partir de la aplicación de la categoría Agua de la metodología MECSA. En particular, se busca identificar las principales características del consumo hídrico y evaluar estrategias de mejora, rehabilitación y optimización en un contexto de aridez. El estudio busca responder: ¿cuáles son las características del consumo hídrico en las escuelas del AMSJ? y ¿qué acciones de mejora, rehabilitación y optimización pueden aplicarse en un contexto de aridez?

METODOLOGÍA

Para cumplir el objetivo, se adoptó una metodología mixta, cuali-cuantitativa, propia de una investigación aplicada y basada en el estudio de caso. Se seleccionaron dos escuelas representativas por su organización funcional y tecnología constructiva, indagando en el uso del agua en cada una. La metodología se organizó en tres etapas secuenciales y complementarias.

En la primera etapa, analítica-descriptiva, se analizaron los Modelos de Certificación de Sustentabilidad para Escuelas (MCS-E) con el objetivo de identificar las principales variables e indicadores asociados al uso eficiente del agua. Se relevaron un total de 10 modelos internacionales, a partir de los cuales se sistematizaron 51 créditos vinculados a la categoría agua. Estas va-

riables fueron agrupadas en criterios comunes que posteriormente fueron comparados con los indicadores de la metodología MECSA. Este análisis permitió establecer correspondencias conceptuales y operativas, definiendo los criterios adoptados en la evaluación de los casos de estudio. Para la sistematización se aplicaron técnicas de análisis documental y fichaje, procesando los datos en planillas de Excel.

En la segunda etapa, de auditoría, se aplicaron los criterios de la categoría Agua de MECSA a los dos casos seleccionados, con el fin de caracterizar el uso hídrico y establecer comparaciones. Las auditorías se realizaron entre 2022 y 2023, en diferentes temporadas del ciclo lectivo.

En la tercera etapa, a partir de los resultados, se propusieron líneas de acción para optimizar el recurso en edificios educativos y, como complemento, se incorpora un análisis económico simplificado con el objetivo de evaluar la viabilidad de las estrategias planteadas. Este enfoque permite establecer una herramienta comparativa para la toma de decisiones en contextos escolares públicos, caracterizados por restricciones presupuestarias y la necesidad de intervenciones de rápida implementación.

Finalmente, en el apartado de discusión y conclusiones, se integraron los aspectos conceptuales predominantes para generar una síntesis conclusiva.

CARACTERIZACIÓN HÍDRICA Y CLIMÁTICA

El AMSJ se ubica a 640 msnm, en un entorno árido con clima desértico y escasez de agua superficial (Gobierno de San Juan, 2021). Según la Norma IRAM 11603 (2012), corresponde a la Zona Bioambiental III-a, templada cálida, con amplitudes térmicas superiores a 14 °C. En verano, las temperaturas medias rondan los 26 °C y en invierno los 11 °C, con precipitaciones anuales reducidas (×95 mm), concentradas en verano. La radiación solar alcanza valores elevados, con un promedio de 7,33 kWh/m² entre octubre y marzo. El recurso hídrico proviene principalmente del deshielo de nieves y glaciares de la Cordillera de

los Andes, que alimentan las cuencas de los ríos San Juan, Jáchal y Valle Fértil.

Esta limitación hídrica condiciona el desarrollo de los asentamientos, generando economías de oasis en las áreas irrigadas. Considerando este concepto como un modelo de ocupación territorial y desarrollo productivo característico de regiones áridas, donde la disponibilidad de agua condiciona fuertemente la localización de los asentamientos y las actividades económicas. En estas áreas, el recurso hídrico es gestionado mediante sistemas de irrigación que permiten sostener la producción agrícola y el abastecimiento urbano en sectores acotados del territorio, generando una fuerte dependencia del agua proveniente de fuentes externas, como el deshielo cordillerano (Miranda, 2015).

En este esquema, el uso del agua para riego agrícola puede entrar en tensión con el uso público-urbano, especialmente en contextos de escasez hídrica prolongada. Si bien ambos usos suelen gestionarse mediante sistemas diferenciados, la disminución en la disponibilidad total del recurso impacta sobre el conjunto del sistema, evidenciando la necesidad de optimizar el consumo en todos los sectores, incluyendo el edilicio. Desde inicios del siglo XXI, la provincia atraviesa un ciclo seco que afecta la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas. La temporada 2021–2022 registró los menores escurrimientos desde 1909, configurando una tendencia crítica frente al cambio climático (Secretaría de Agua y Energía, 2023). Esta situación plantea la necesidad de replantear el esquema de uso del recurso en todos los ámbitos.

CASOS DE ESTUDIO

El Colegio Central Universitario Mariano Moreno (CCU) es un establecimiento de educación pública de nivel secundario, construido en 1965 y emplazado en el departamento de Capital, dentro del AMSJ (Figura 1). Dicha institución responde a un prototipo nacional diseñado en el marco del Plan Quinquenal, llevado a cabo en el Gobierno de J. D. Perón. La tipología edilicia de la escuela es la Lineal en Peine, característica de la época

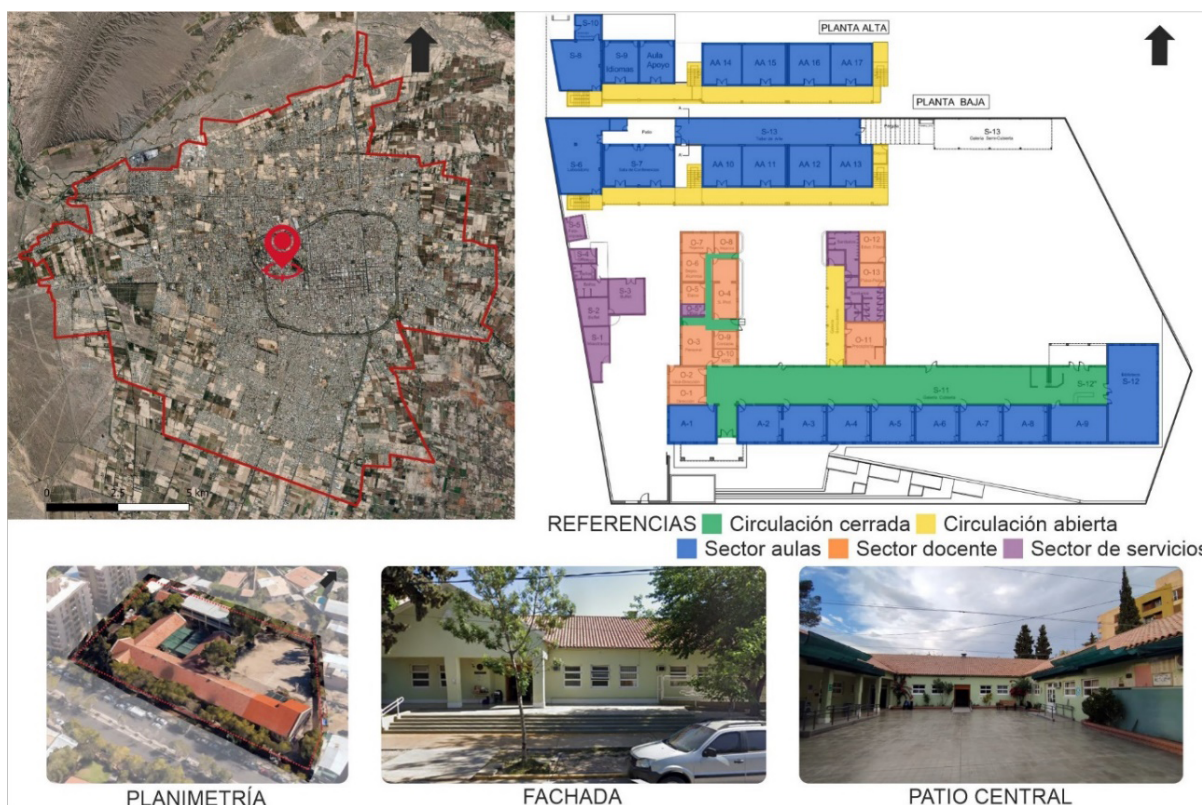
y utilizada en gran parte de las escuelas del país (Ré y Michaux, 2023).

El edificio se desarrolla en planta baja y planta alta y posee una superficie útil de 857 m². El prototipo original cuenta con una circulación cubierta que comunica las aulas orientadas al Sur y el sector docente. Además, dispone de una galería semicubierta que conecta el sector de servicios orientado al Este. La tecnología constructiva es de muros de mampostería de ladrillo macizo de 34 cm de espesor y terminación exterior de revoque, enlucido y pintura. El cerramiento superior es un techo a dos aguas con estructura de madera, cubierta de tejas y cielorraso suspendido. Respecto a las carpinterías, las mismas son de madera con vidrio simple repartido. El sector ampliado vincula las aulas distribuidas en planta baja y primer piso mediante una circulación semicubierta (Ré y Michaux, 2023).

El Colegio Superior N.º 1 de Rawson (CSiR) es un establecimiento de educación pública de nivel secundario, construido en 2005 y emplazado en el departamento de Rawson, dentro del AMSJ (Figura 2). Dicha institución responde a un prototipo nacional diseñado en el marco del Programa Nacional 700 Escuelas, el cual se ejecutó entre 2004 y 2008 en todo el país. En San Juan se edificaron 25 edificios con esta tipología, de los cuales 9 se encuentran ubicados en el AMSJ (Ré, 2017).

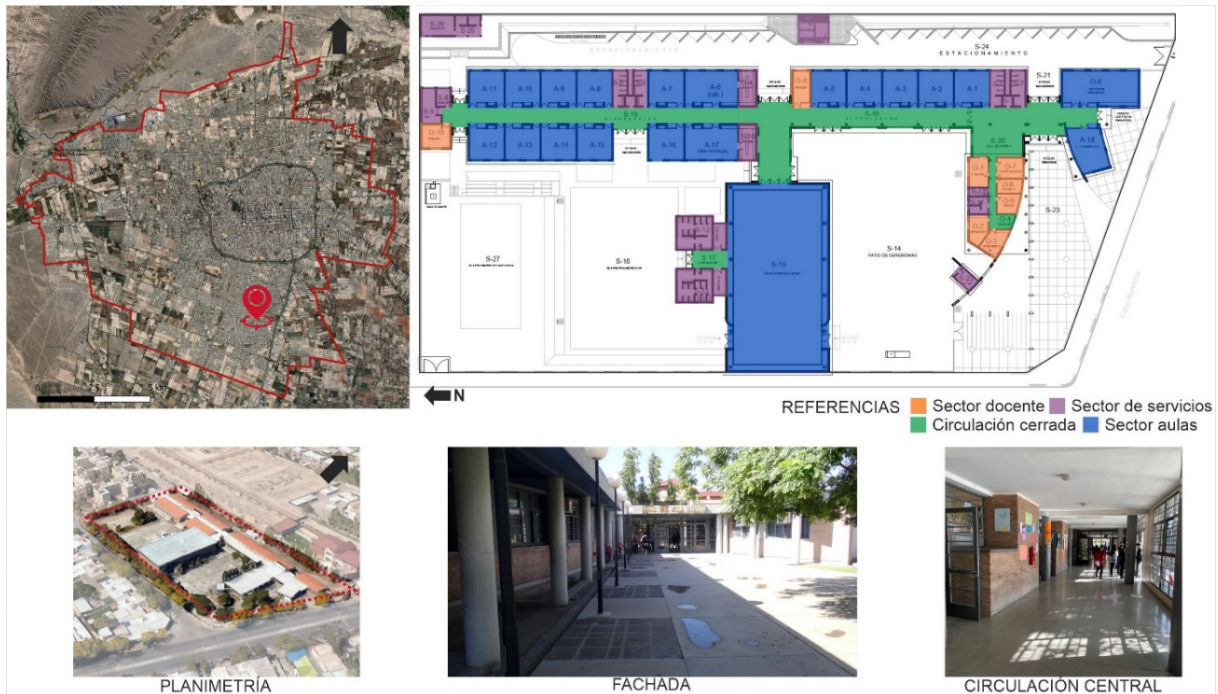
El edificio se desarrolla en planta baja y posee una superficie útil de 3018 m². Respecto a su organización funcional, el mismo se estructura en base a una circulación central que divide el sector de aulas. Además, dicha circulación conecta el SUM y el sector docente orientados al Sur. La envolvente vertical es de mampostería de ladrillón de 30 cm con revoque grueso y fino, mientras que las particiones internas son de mampostería de ladrillón de 20 cm. Para los sectores docentes

Figura 1
CCU, localización en el AMSJ (izq.), organización funcional (der.) e imágenes (abajo)



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth (2024).

Figura 2
CSiR, localización en el AMSJ (izq.), organización funcional (der.) e imágenes (abajo)



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth (2024a).

se utilizan paneles de yeso. Los techos de las aulas son de losa inclinada; para el SUM se utiliza una estructura metálica con cubierta de chapa y las circulaciones cerradas son de losa plana. Por otra parte, la carpintería de todo el edificio es metálica y los pisos interiores son de granito pulido (Ré, 2017).

RESULTADOS

ETAPA 1. LOS MCS-E Y LA METODOLOGÍA MECSA

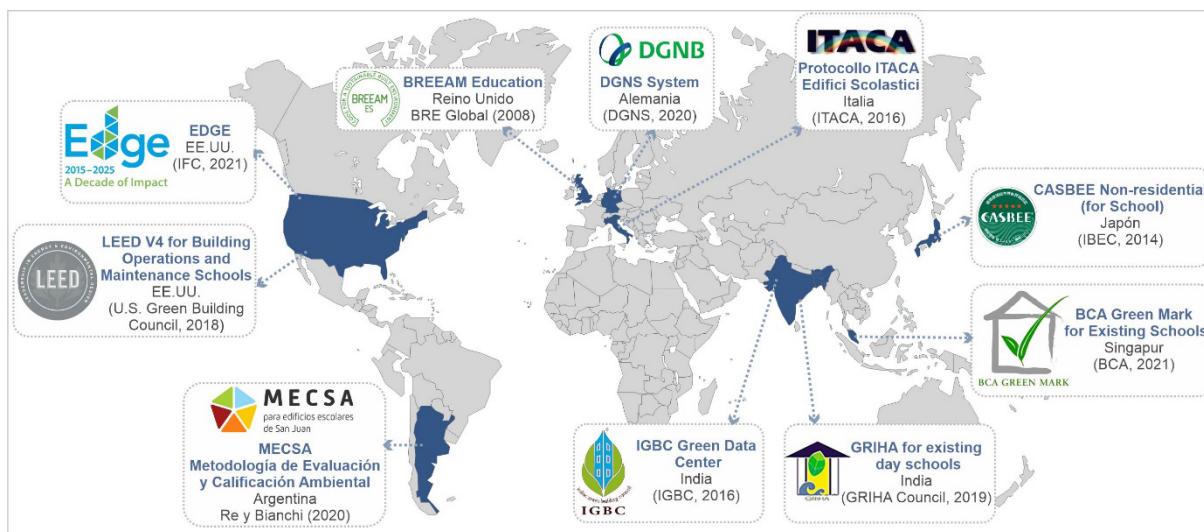
A escala global, los MCS-E incluyen categorías específicas relacionadas con el agua, y otorgan puntos por la aplicación de estrategias que promuevan su conservación y consideren el uso eficiente de la misma como un aspecto clave para evaluar la sustentabilidad de los edificios escolares. En este contexto se realiza un análisis teórico-descriptivo de 10 modelos de certificación y calificación de edificios escolares y se estudian los criterios que componen la categoría Agua en

cada uno de ellos. En todos los casos se utiliza la última versión disponible (ver Figura 3).

La cantidad de MCS-E en el ámbito internacional es sustancial, amplia y en constante crecimiento durante las últimas décadas, variando según el sector y la región. En esta línea, la diversidad de sistemas refleja las distintas necesidades y enfoques hacia la sustentabilidad en los diferentes sectores del ámbito construido; no obstante, son exiguos los modelos con un enfoque específico para escuelas. En cuanto a la cantidad de créditos que integran la categoría Agua, estos representan entre el 5,3% y el 27,3% del total, siendo EDGE (IFC, 2021) quien más créditos posee en la temática (18 de 66) y DGNB (DGNS, 2020) el sistema con menos (2 de 32) (Figura 4).

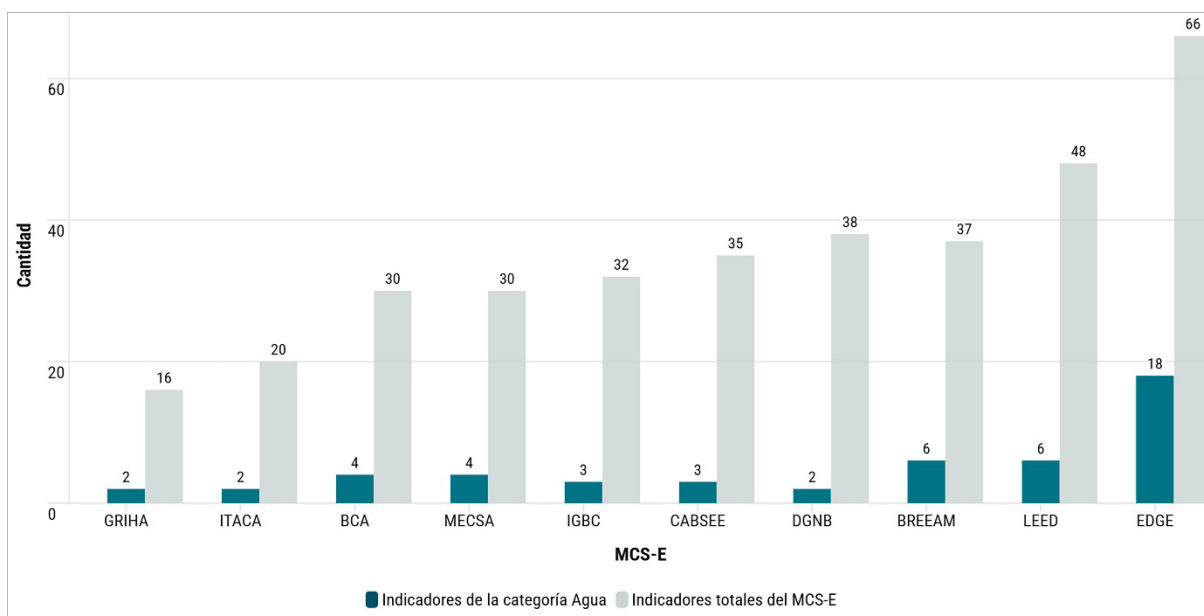
Sin embargo, si se considera la participación relativa de la categoría de agua en comparación con el resto, es decir, el grado de importancia asignado respecto a todo el instrumento de evaluación, se observa que posee un peso entre el 2% y el 33% de acuerdo con el sistema, siendo el valor promedio de 12,5%. En EDGE es donde la

Figura 3
MCS-E analizados

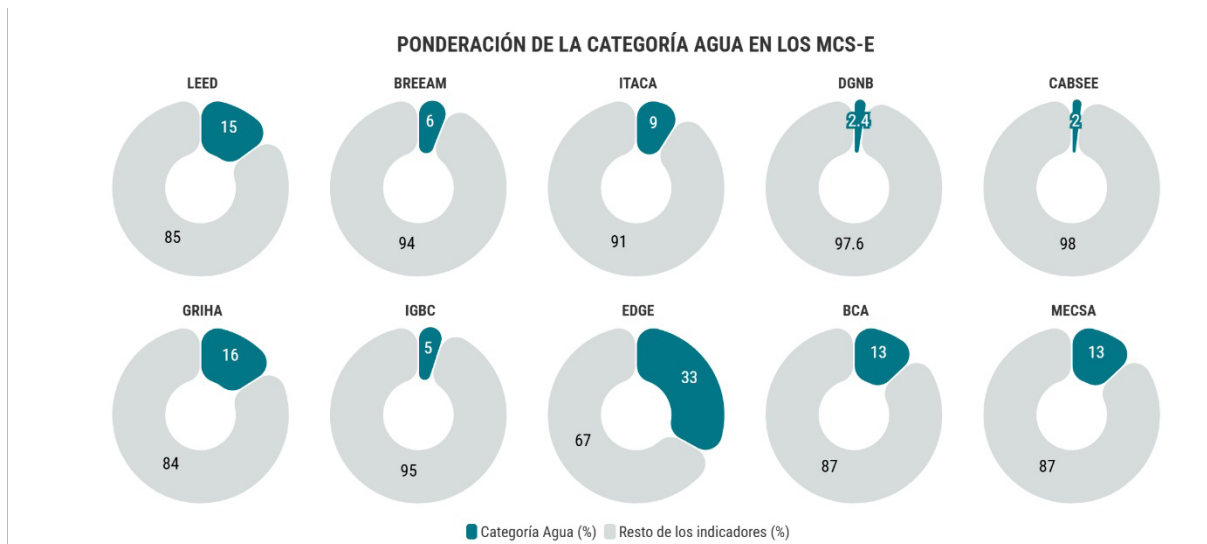


Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 4
Indicadores en los MCS-E e indicadores de la categoría Agua (sup.) y ponderación de la categoría agua en los MCS-E (inf.)



(Continuación)



Fuente: Elaboración propia, 2024.

categoría en estudio tiene mayor participación respecto al total, mientras que en CASBEE (IBEC, 2014) y DGNB ronda el 2% del total.

A nivel específico, del análisis de los 51 créditos, pertenecientes a los 10 MCS-E, se observa que son 7 los denominadores comunes, presentes en casi la totalidad de certificados. Los criterios de Reutilización y reciclaje de aguas residuales y de Reducción del uso de agua interior son los de mayor predominancia, ya que están presentes en el 80% de los casos. En segundo lugar, se encuentra Medición del uso del agua, en el 60% de los casos. Además, se considera que el certificado más completo es EDGE y BCA Green Mark (BCA, 2021), ya que son los que incorporan mayor cantidad y diversidad de criterios de la temática en estudio (ver Tabla 1).

En Argentina, existe una elevada utilización del servicio de agua potable, el cual supera los valores sugeridos por las Naciones Unidas (2024). Según el Protocolo eSe (Colegio de Arquitectos de Córdoba, 2018), se consumen en los edificios públicos de Argentina casi el doble de la línea de cálculo de referencia. Los Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar (Ministerio de Educación, 1998) establecen una disponibilidad de agua potable de 35 litros por alumno y por día, en el turno más desfavorable (sin conside-

rar el uso de comedor, gimnasio, albergue, etc.). Por tal, la disponibilidad de agua potable es resultado de la cantidad de alumnos que utilizan las instalaciones según la propuesta educativa y arquitectónica.

En base a lo mencionado, se detalla cada crédito de la categoría Agua de MECSA. Dicha herramienta integra dos formas de puntuación (Ré y Bianchi, 2020). Por un lado, se encuentra el sistema de “Puntos por sumatoria”, donde la operación algebraica de su nombre permite agregar puntos en base al cumplimiento total, parcial o nulo de cada indicador. Por otro lado, el sistema de “Puntos por rango” posibilita seleccionar un solo puntaje en base al desempeño del crédito. En MECSA, los cuatro criterios de la categoría Agua tienen un puntaje máximo de 4 puntos, lo que indica que ninguno prevalece sobre el otro.

CRITERIO N.º 1 USO RESPONSABLE DEL AGUA

El objetivo es apoyar la gestión del agua e identificar oportunidades de ahorro mediante su seguimiento. Para esto debe asegurarse de que el consumo de agua pueda ser monitoreado y gestionado y, por lo tanto, animar a su reducción. Se fomenta tomar registro de los datos del medidor de forma mensual y su compilación durante, al

Tabla 1
Predominancia de criterios de la categoría agua.

Criterios de la categoría agua	MCS-E									
	LEED (USGBC, 2018)	BREEAM (BRE Global, 2008)	ITACA (2016)	DGNB (DGNS, 2020)	CABSEE (IBEC, 2014)	GRIHA (GRIHA Council, 2019)	IGBC (2016)	EDGE (IFC, 2021)	BCA (2021)	MECSA (Ré y Bianchi, 2020)
Reducción del uso de agua interior	§	§	§	§	§	§			§	§
Reducción del uso de agua al aire libre	§	§	§		§					
Medición del uso del agua	§	§				§	§	§	§	
Reutilización y reciclaje de agua residual		§		§	§	§	§	§	§	§
Uso de fuentes alternativas de agua (ej. lluvia)					§	§		§	§	§
Equipamiento para el ahorro de agua							§	§	§	§
Sistema de riego eficiente								§		§

Fuente: Elaboración propia, 2024.

menos, un año para establecer una línea de base del uso del agua. Los medidores deben calibrarse dentro del intervalo recomendado por el fabricante. Además, cuando haya más de un edificio en el sitio dentro del alcance de la evaluación, cada uno debe medirse por separado. Este criterio promueve las mediciones de AG o AP que se suministren al edificio.

El puntaje asignado a este criterio se establece a partir de dos condiciones principales. En primer lugar, si el edificio escolar cuenta con medidores de agua o aplicaciones que permitan llevar un monitoreo del consumo, se otorga hasta un 50% de la ponderación total del indicador, alcanzando un máximo de 4 puntos. En segundo lugar, si la institución logra un ahorro superior al 20% respecto a los valores establecidos en los Criterios de Arquitectura Escolar (1998), que fijan un consumo de referencia de 35 litros por alumno por día en el turno más desfavorable, se le asigna el 50% restante de la puntuación. De este modo, la combinación de ambas condiciones permite alcanzar el puntaje máximo previsto para este criterio, equivalente a cuatro puntos.

CRITERIO N.º 2 INCLUSIÓN DE SISTEMAS AHORRADORES DE AGUA

Este criterio tiene como objetivo identificar el uso de sistemas economizadores de agua, ya que es posible ahorrar entre el 40 y el 60% del caudal (OCU, 2024), dependiendo del tipo de MCS-E. Entre los artefactos ahorradores se encuentran los sanitarios de alta eficiencia, urinarios ecológicos, grifería temporizada, uso de aireadores en griferías, entre otros. Este criterio se califica en función del porcentaje de artefactos eficientes instalados en la institución. Si al menos el 70% de los artefactos (como sanitarios de bajo consumo, griferías temporizadas, aireadores o urinarios ecológicos) corresponde a sistemas ahorradores, se otorgan los 4 puntos posibles, con una ponderación del 100% del indicador. En cambio, si la proporción de artefactos eficientes se encuentra entre el 40% y el 70%, el puntaje asignado equivale al 50% de la incidencia del criterio.

CRITERIO N.º 3 TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISAS Y PLUVIALES

AGUAS GRISAS

La reutilización de AG en escuelas representa una solución viable para abordar la escasez de agua, que además se orienta a promover las prácticas sostenibles de gestión del recurso. Las AG suponen entre un 30% y un 90% de las aguas residuales en los edificios. Estas se pueden almacenar y reutilizar posteriormente, mediante los tratamientos adecuados (Al-Shurafat et al., 2021). El aprovechamiento de AG permite abastecer descargas de inodoros, riego o torres de refrigeración, una vez han sido tratadas. De esta manera, se crea un circuito cerrado de agua reutilizada que permite reducir el consumo de la red general (Subramanian et al., 2020).

El objetivo es fomentar la incorporación de un sistema de tratamiento de AG in situ generadas. Se toma como base lo estipulado por BRE Global (2008), donde se recoge al menos el 80% de las aguas residuales de lavabos y duchas y se reciclan para satisfacer una parte o el total de la demanda de descarga de inodoros, mingitorios y riego.

AGUAS PLUVIALES

El agua de lluvia se puede recolectar del techo o del suelo y, posteriormente, almacenar y reutilizar para fines domésticos, paisajismo, lavado, etc. Es factible calcular la cantidad máxima aproximada de agua a obtener mediante un sistema de recolección de agua de lluvia utilizando los datos pluviométricos de la ubicación del proyecto y el tamaño de la superficie del techo. Si bien el supuesto predeterminado es que el techo servirá como sistema de recolección de agua de lluvia, un sistema ubicado en el suelo cumple la misma función, siempre y cuando tenga las dimensiones correspondientes.

El objetivo es fomentar la recolección, acumulación y reutilización de AP en el predio escolar y en reemplazo del consumo del suministro municipal de agua potable. El AP puede utilizarse para satisfacer las necesidades de descarga de

inodoros, para limpieza o riego. Es necesario, para cumplir la premisa, que el agua de lluvia recolectada se reutilice en la escuela y que reemplace el suministro municipal cuando sea posible de acuerdo con la disponibilidad. Se toma como referencia lo propuesto por GRIHA Council (2019), donde al menos el 70% de la escorrentía generada debe recuperarse, dependiendo del nivel de precipitaciones del lugar. Se fomenta tomar esto en consideración para el dimensionado del tanque de recolección de agua de lluvia. Del sistema EDGE (2021) se toman las siguientes pautas generales como guía:

Ecuación 1

Fórmula para captación de agua

$$\text{Captación de agua (m}^3\text{)} = \frac{\text{sup. de captación} \times \text{volumen de precipitaciones} \times \text{coef. de escorrentía}}{100}$$

Fuente: EDGE, 2021.

Donde:

- superficie de captación = superficie del techo o estructura destinada a tal fin (m²).
- volumen de las precipitaciones = precipitaciones promedio anuales (mm).
- coeficiente de escorrentía = varía en función del tipo de superficie (ej. techo metálico: 0,95 o techo de concreto: 0,90).

El criterio de tratamiento y reutilización de AG y AP se puntúa según el alcance del sistema implementado en la escuela. Cuando se incorporan simultáneamente ambos sistemas, se otorgan los 4 puntos máximos con una incidencia del 100% en la ponderación del criterio. Si únicamente se aplica uno de ellos (ya sea el tratamiento y reutilización de AG o bien de AP), el puntaje asignado equivale al 50% del total.

CRITERIO N.º 4 RIEGO EFICIENTE

El objetivo es reducir el consumo de agua potable para riego, mediante la implementación de estrategias de optimización del recurso, evitando el riego por inundación superficial, donde el agua se distribuye sin control localizado. Para la determinación de las necesidades hídricas de la flora, se diferencian y contabilizan los distintos tipos de árboles y el área de césped, sumadas a

las pérdidas por conducción para el aspersor más alejado; de esta forma se determina el volumen total disponible a tener almacenado en el tanque cisterna. Se prevé que dicho tanque de reserva sea abastecido por la recolección de AG y AP (Criterio N.º 3).

En complemento, se fomenta el diseño de un sistema integrado de jardinería que haga uso eficiente del agua. En particular, conseguir una demanda promedio de menos de 4 litros de agua por m² de jardín por día (EDGE, 2021). Para lograrlo, las plantas que requieren un riego intensivo pueden reemplazarse por plantas autóctonas y con una mayor capacidad de adaptación. El consumo de agua para áreas al aire libre, incluidos césped, jardines y estanques, se calcula de la siguiente manera (EDGE, 2021):

Ecuación 2

Fórmula para consumos de agua en jardinería

Consumo de agua para jardinería = $\frac{\text{necesidad de agua para jardinería} \cdot \text{vol. de precipitaciones}}{\text{superficie total de parque al aire libre}}$

Fuente: EDGE, 2021.

Donde:

- necesidad de agua para jardinería = cantidad promedio de agua requerida por día para todas las plantas del área de jardines al aire libre (en litros).
- volumen de precipitaciones = promedio anual de precipitaciones diarias (en litros).
- superficie total de jardines al aire libre = área de césped, jardines y estanques (m²).

El criterio de Riego eficiente se evalúa mediante una suma de condiciones que permiten alcanzar un máximo de 4 puntos. En primer lugar, si la escuela dispone de un sistema de riego eficiente, por goteo y/o aspersores, se asigna el 50% de la puntuación total. Adicionalmente, se otorga un 25% cuando la jardinería demanda en promedio menos de 4 litros de agua por m² de superficie verde por día, lo que implica la selección de especies adaptadas y de bajo requerimiento hídrico. Finalmente, otro 25% se concede si existe una gestión adecuada del agua utilizada en la limpieza de superficies exteriores construidas. La suma

de estas condiciones permite alcanzar el máximo de cuatro puntos.

ETAPA 2. AUDITORÍA A LOS CASOS DE ESTUDIO

Las auditorías en edificios escolares sirven para reconocer los aspectos más vulnerables e identificar problemas ambientales, energéticos y de habitabilidad, que requieran de soluciones y propuestas de mejoramiento. Además, ofrecen información sobre cómo las escuelas pueden reducir la contaminación ecológica y mejorar la biodiversidad (Banu et al., 2023). Seguidamente, se muestran los resultados de la auditoría a los casos de estudio y las posibles estrategias de mejora.

CRITERIO N.º 1 USO RESPONSABLE DEL AGUA

En el marco del análisis del uso responsable del agua, durante las visitas a los establecimientos se realizó un relevamiento y seguimiento del consumo hídrico a lo largo de una jornada completa. En el caso del colegio CCU, se observó la ausencia de medidores que permitan cuantificar el consumo, por lo que se recurrió a una estimación basada en observaciones directas, la cantidad de estudiantes, la frecuencia de uso de los sanitarios y la actividad en el sector de servicios. El relevamiento de artefactos y bebederos¹ evidenció un estado de mantenimiento general regular, con pérdidas de agua en algunos sectores, lo que implica un uso ineficiente del recurso. Una situación similar fue registrada en el establecimiento CSiR (ver Figura 5).

El consumo estimado de agua en las escuelas, considerando tanto el uso interior como el destinado al riego, asciende a 3.688.360 litros anuales en el caso del CCU y a 5.190.640 litros anuales en el CSiR. Estas estimaciones se basan en la cantidad de usuarios, la frecuencia diaria de uso de los artefactos y el caudal medio por uso. Cabe destacar que el consumo interior diario en ambos establecimientos supera el valor recomendado por los Criterios de Arquitectura Escolar (1998) (Figura 5). En relación con el uso interior, las

1. Dispositivo fijo para el suministro de agua potable destinado al consumo directo.

Figura 5
 Uso del agua en los casos de estudio (sup.) y consumo de agua interior anual (inf.)



Fuente: Elaboración propia, 2025.

canillas² de cocinas, talleres y laboratorios concentran el mayor volumen de consumo. Aunque en menor cantidad que las de los baños, estas no cuentan con aireadores, lo que incrementa significativamente el caudal utilizado.

CRITERIO N.º 2 INCLUSIÓN DE SISTEMAS AHORRADORES DE AGUA

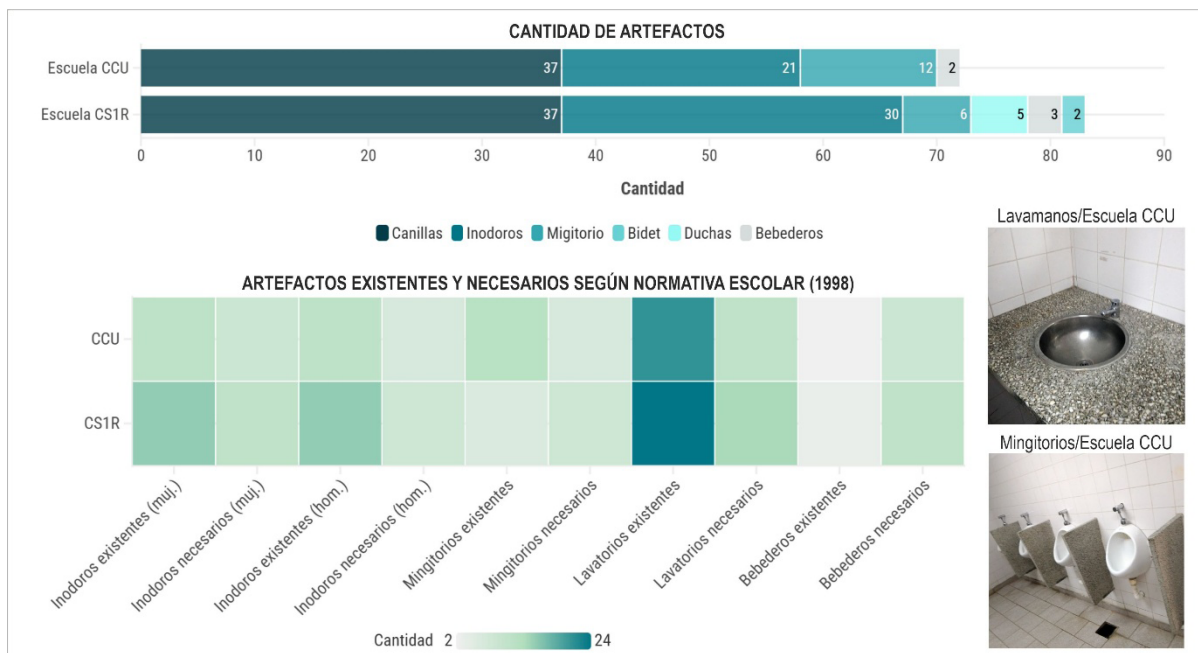
Luego del relevamiento de los artefactos, se observa que en ambos casos el mantenimiento y estado de estos es medio. Se menciona que los dos colegios poseen en los baños canillas temporizadas, las cuales ahorran más agua en comparación con las canillas tradicionales, ya que funcionan con un mecanismo que permite el flujo de

agua solo por un tiempo determinado, evitando que el agua se desperdicie (Domínguez, 2022). Además, en ambos casos de estudio, los inodoros y mingitorios poseen válvula Sloan, por lo cual ahorran agua debido a su diseño eficiente de descarga. Esto se debe a que, a diferencia de los tanques tradicionales, las válvulas Sloan liberan solo la cantidad de agua necesaria por descarga, evitando el uso excesivo. Asimismo, funcionan con presión directa de la red, lo que optimiza el uso del caudal y permite una limpieza eficiente con menos volumen de agua (Especificar, 2022).

Referente a la cantidad de artefactos por alumno, el Ministerio de Educación (1998) establece: 1 inodoro cada 40 alumnos varones o cada 20 alumnas mujeres, 1 mingitorio cada 40 alumnos varones, 1 lavabo cada 40 alumnos varones y/o

2. Sinónimo de grifo o llave de agua.

Figura 6
Artefactos en caso de estudio (sup.) y cantidad de artefactos en Escuela CCU y CS1R (inf.)



Fuente: Elaboración propia, 2025.

mujeres y 1 bebedero cada 50 alumnos. Considerando que en 2024 el CCU cuenta con una matrícula aproximada de 430 alumnos, de los cuales cerca del 60% son varones, y disponiendo de la cantidad de artefactos sanitarios indicada en la Figura 6, puede afirmarse que todos los artefactos son suficientes para la matrícula promedio.

Un escenario similar se observa en el CS1R, que registra una matrícula promedio de 540 alumnos en el turno más desfavorable y la dotación de mingitorios, lavamanos e inodoros destinados a varones y mujeres es suficiente. Respecto a los bebederos, el CCU dispone de dos, los cuales presentan un uso ineficiente del recurso hídrico debido a la falta de mantenimiento, cuando la normativa del Ministerio de Educación (1998) establece que deberían existir aproximadamente 9 unidades. En el CS1R, en cambio, se cuenta con tres bebederos, un número muy por debajo de las 11 unidades requeridas para responder a su elevada matrícula estudiantil (ver Figura 6).

CRITERIO N.º 3 TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES Y PLUVIALES

AGUAS GRISES

En ninguno de los casos de estudio se realiza el tratamiento o reutilización de las AG que pudieran reducir el consumo de agua del suministro municipal y, por ende, la carga sobre la infraestructura local de abastecimiento de agua y la red cloacal. No obstante, se identifican diversas potencialidades en este criterio, ya que el posible aprovechamiento de las AG podría aplicarse para satisfacer una parte o el total de la demanda de descarga de inodoros/urinarios dentro del edificio (previo tratamiento) o para el riego en espacios exteriores.

AGUAS PLUVIALES

Al igual que en el caso de las AG, ninguno de los dos establecimientos de estudio recolecta ni almacena AP, las cuales podrían destinarse al riego. Para cumplir con este criterio, el agua de lluvia debería ser recolectada, reutilizada dentro

del predio escolar y demostrarse su capacidad para reemplazar parcialmente el suministro de red, contribuyendo así a su reducción. Además, el almacenamiento de AP evita su escurrimiento hacia los cauces urbanos, mitigando el riesgo de saturación del sistema pluvial a escala urbana. Se observa que ambos establecimientos muestran potencialidades para el almacenamiento y la recolección (ver Figura 7).

CRITERIO N.º 4 RIEGO EFICIENTE

En base a los relevamientos realizados a los casos de estudio, se determina que, en ambas escuelas, el sistema actual de riego no permite reducir el consumo de agua potable para riego mediante el uso de estrategias de recuperación u optimización del agua. No existe riego diferenciado o zonificado según las áreas externas y su paisajismo, y tampoco se observa un sistema de riego integrado que permita la incorporación de AP.

En el CCU, el riego se realiza con mangueras conectadas a dos cisternas bombas y la frecuencia de riego varía entre dos o tres veces por semana según la época del año. La escuela dispone de cuatro canillas exteriores. En el CS1R, el riego se realiza a manto, con baldes y mangueras conectadas a una cisterna bomba. En el sector

Sur, donde se encuentran plantados álamos, se utilizan mangueras. Para las moras y el resto de vegetación del patio central se utiliza un sistema de riego por goteo. La frecuencia de riego varía entre dos o tres veces por semana según la época del año. En general, el riego se divide por sectores (sector este, oeste, norte y sur) y se realiza a primera hora de la mañana (Figura 7). La escuela dispone de siete canillas exteriores. En ambos colegios el riego dura aproximadamente 1 hora.

En base a los datos obtenidos de los relevamientos (frecuencia de riego, duración y sistema utilizado), se realiza un cálculo aproximado y se llega a que el consumo de agua para riego anual en el CCU es de 38.610.000 litros, mientras que para el CS1R el valor asciende a 84.240.000 litros.

En base a lo explicitado previamente, se determina que el puntaje de la Categoría Agua de MECSA es de 0 puntos. No obstante, se identifican diversas líneas de acción y propuestas de mejora que se desarrollan en el próximo apartado.

ETAPA 3. PROPUESTAS DE MEJORA

CRITERIO N.º 1 USO RESPONSABLE DEL AGUA

Como primera medida, se propone la implementación de un sistema de medición y monitoreo

Figura 7
Cubiertas de techo en CCU y CS1R (sup.) y Sistema de riego en CCU y CS1R (inf.).



Fuente: Elaboración propia, 2025.

del consumo de agua; esto permitirá que tanto el CCU como el CSiR puedan registrar su consumo real y, en base a eso, detectar anomalías, analizar tendencias e identificar desperdicios. Para el CCU se plantea la reparación y mantenimiento de las instalaciones sanitarias, en particular, corregir las pérdidas de agua en inodoros y bebederos y, de forma conjunta, realizar inspecciones periódicas para evitar nuevas mermas.

De forma complementaria, se expresa recolectar el agua de condensación de aires acondicionados y utilizar la misma para la descarga de inodoros. Al momento, dicha agua se desperdicia (Figura 5). Se considera que en el CSiR existen 11 aires acondicionados, tipo Split, de 1060 W de potencia y en el CCU existen 35 aires acondicionados, 25 tipo Split y 10 de ventana de potencia similar a los del CSiR. En base a ASHRAE (2020), Carrier (1965) y Stoecker y Jones (1982), un aire acondicionado de 1,06 kW funcionando 6 horas al día en San Juan puede generar entre 0,5 y 2,7 litros de agua de condensación por día, dependiendo de la humedad ambiente y el nivel de uso del equipo. En este caso se adopta el valor promedio, siendo de 1,6 litros por día. Si se considera que funcionaron solo el 70% de los aires acondicionados en cada establecimiento y se multiplica esta cantidad por 1,6 litros de agua generada y por 130, que es la cantidad de días aproximados de clase en el ciclo lectivo 2024 según el cronograma institucional de los establecimientos (CCU, 2025). Los resultados evidencian un recurso hídrico desaprovechado en ambos establecimientos. En el caso del CCU, se podrían recuperar aproximadamente 5.200 litros anuales, mientras que en el CSiR la estimación alcanza los 1.664 litros. Esta cantidad de agua sería suficiente para cubrir aproximadamente 867 descargas de inodoro en el CCU y 277 en el CSiR, lo que pone de manifiesto su potencial de aprovechamiento para usos no potables.

CRITERIO N.º 2 INCLUSIÓN DE SISTEMAS AHORRADORES DE AGUA

Tanto para el CCU como para el CSiR se propone avanzar en el reemplazo de artefactos me-

dante cuatro líneas de acción: incorporación de dispositivos de ahorro en canillas, como sensores, aireadores y controladores de caudal, que reduzcan el consumo sin afectar su percepción (GENEBRE, 2025); sustitución de inodoros por modelos de doble descarga, que optimizan el uso según el tipo de residuo (Elliott, 2024); reemplazo de mingitorios por modelos secos que no requieren agua y evitan olores mediante cartuchos sellantes (Ferrum, 2021); y mejora de bebederos mediante temporizadores o sensores que eviten el flujo continuo, incorporando además modelos más eficientes para consumo directo y llenado de botellas (Voda, 2025).

El potencial de ahorro anual derivado de la incorporación de sistemas ahorradores de agua presenta valores significativos en ambas instituciones analizadas. En la Escuela CCU, los lavamanos permiten una reducción de 57.200 litros anuales, los inodoros de 678.600 litros, los mingitorios de 561.600 litros y los bebederos de 342.680 litros, lo que en conjunto representa un ahorro total de 1.640.080 litros por año. Por su parte, en la Escuela CSiR, los lavamanos generan un ahorro de 68.380 litros anuales, los inodoros de 829.530 litros, los mingitorios de 695.760 litros y los bebederos de 415.350 litros, alcanzando un total de 2.009.020 litros por año. Estos resultados ponen de manifiesto que la sustitución de artefactos convencionales por dispositivos eficientes constituye una estrategia de gran impacto para la reducción del consumo de agua en establecimientos escolares.

A partir de los resultados, se propone implementar las mejoras de forma gradual, priorizando los dispositivos más ineficientes (como canillas con pérdidas, inodoros de alto consumo o duchas sin restricción) en sectores de mayor uso. Se recomienda comenzar con soluciones de bajo costo, privilegiando adaptaciones frente a reemplazos, como la instalación de aireadores en canillas. En contextos de recursos limitados, se prioriza además el mantenimiento preventivo, mediante la reparación de fugas y el ajuste de válvulas para reducir el caudal.

CRITERIO N.º 3 TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES Y PLUVIALES

AGUAS GRISES

Para cumplir con este criterio, se plantea calcular el suministro potencial de AG que podría tratarse y que, mediante su reutilización, aportaría a reducir la demanda principal de agua de red. Las AG que pueden ser tratadas y reutilizadas provienen principalmente de: canillas de lavamanos, laboratorios y duchas; se descartan las piletas de limpieza y fregaderos, ya que pueden contener aceites o detergentes fuertes. Considerando la cantidad de artefactos en cada caso de estudio, se llega a que en la escuela CCU podría recuperarse 287.040 litros de agua anual, mientras que en CSiR el valor de recuperación asciende a 1.511.640 litros.

Se propone que el AG sea recolectada mediante un sistema de cañerías independientes a un depósito (enterrado) donde se realice un pretratamiento de esta. En este depósito se eliminan sólidos (como cabellos o restos de jabón) mediante rejillas; seguidamente, se utiliza un filtro de arena y, finalmente, cloración para desinfección. El agua tratada se almacena en un tanque separado

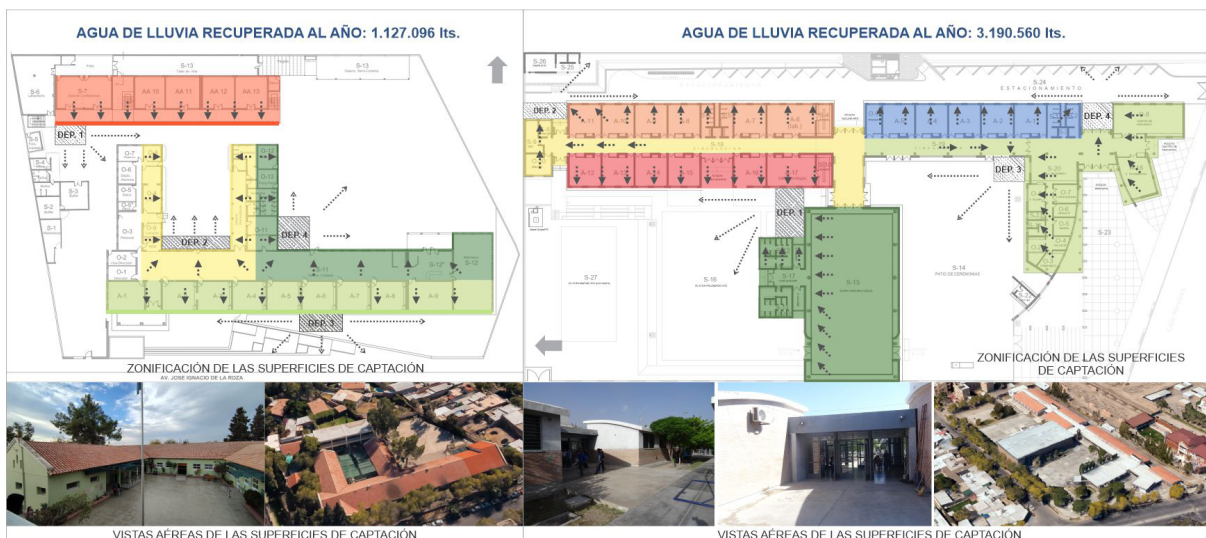
y, luego del proceso de filtrado y desinfección, se encuentra en condiciones de ser utilizada para riego, limpieza en exteriores y reutilización en inodoros y mingitorios.

AGUAS PLUVIALES

Respecto al AP, se plantea el cálculo siguiendo la metodología propuesta en la Ecuación 1. Para esto, se zonifican las cubiertas de techo en base a su materialidad y su pendiente y se calcula la superficie de captación (m²). Luego se obtiene el volumen de precipitaciones promedio anual (mm), para lo cual se elabora una base de datos de precipitaciones de los últimos 50 años. Por último, se trabaja con coeficientes de escorrentía en función de la materialidad de cada cubierta.

Para el establecimiento CCU, se dividen las cubiertas de techo en cuatro zonas y cuatro depósitos de recolección y se determina la captación de agua (m³) de cada una de ellas. Para el CSiR se particionan seis áreas y cuatro depósitos. Para el establecimiento CCU es viable recuperar 1.127.096 litros anuales y para CSiR el valor se incrementa debido a su mayor superficie, llegando a 3.190.560 litros recuperados al año. De forma complementaria, en la Figura 8 se muestra la posible ubicación de cada depósito con sus dimensiones aproximadas.

Figura 8
Esquema de sistema de captación de AP para CCU (izq.) y CSiR (der.)



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Se propone utilizar el agua de lluvia para riego; por tal, los depósitos deben construirse siguiendo las recomendaciones técnicas y sanitarias para evitar que el agua se degrade. Asimismo, el depósito permanecerá cerrado para evitar luz, insectos y algas, y se debe asegurar su limpieza y mantenimiento acorde a su propósito. De forma complementaria, se ha considerado la captación de AP sobre terreno natural.

El análisis de la captación muestra diferencias significativas entre ambas instituciones, debido principalmente a la diferenciación de superficies recolectoras. En el CCU, se estima una recolección anual de 1.127.096 litros a partir de las superficies de techos y de 1.059.840 litros provenientes de pisos, lo que totaliza 2.186.936 litros por año. En el CS1R, los volúmenes recuperados son considerablemente mayores: 3.190.560 litros en techos y 4.173.120 litros en pisos, alcanzando un total de 7.363.680 litros anuales. Considerando los resultados obtenidos en la etapa de auditoría y de propuesta de los criterios N.º 3 y 4, se presenta que en los períodos de mayores lluvias (de diciembre a febrero), donde la escuela se encuentra cerrada por vacaciones, se utilice el AP para riego de zonas verdes y limpieza de las áreas exteriores. De forma complementaria, durante el período escolar (de marzo a noviembre) se sugiere utilizar el AP de forma compartida tanto para riego como para consumo en inodoros y mingitorios.

CRITERIO N.º 4 RIEGO EFICIENTE

Como estrategia de mejora, se propone incorporar en todas las áreas verdes (árboles, arbustos y césped) un sistema de riego por goteo subterráneo vinculado a depósitos de acumulación de AP y AG. Las superficies vegetadas abarcan 550 m² en el CCU y 1.200 m² en el CS1R, lo que implica un consumo máximo recomendado de 240 y 480 litros por riego, respectivamente (Monge Redondo, 2019).

Actualmente, con dos riegos semanales, el CCU demanda 46.800 litros anuales, que podrían reducirse a 18.720 litros con un sistema eficiente, generando un ahorro de 28.080 litros/año. En el

CS1R, el consumo pasaría de 93.600 a 37.440 litros anuales, con un ahorro de 56.160 litros/año.

Dado que en ambas escuelas predominan especies de porte medio (moras, pinos y paraísos), se sugiere en el mediano plazo un relevamiento de la vegetación y, de ser necesario, su reemplazo por especies nativas, más adaptadas al clima árido y de menor requerimiento hídrico.

ESTIMACIONES ECONÓMICAS

COSTO-BENEFICIO

Para la evaluación económica de las propuestas de mejora se adoptó un enfoque simplificado de análisis costo-beneficio, orientado a facilitar la comparación entre estrategias en contextos escolares públicos. La metodología se estructuró a partir de tres variables principales: el costo inicial de implementación, el ahorro hídrico anual estimado y el periodo de retorno de la inversión.

En función de estos indicadores, las medidas fueron clasificadas según su nivel de inversión (bajo, medio y alto) y su periodo de recuperación (corto, medio y largo). Asimismo, se incorporó un criterio de priorización basado en la relación entre costo e impacto, con el objetivo de identificar las intervenciones más convenientes en escenarios de recursos limitados. Este enfoque se encuentra en línea con metodologías utilizadas en estudios de eficiencia en edificios, donde se prioriza el uso de indicadores accesibles para la toma de decisiones.

En particular, la IEA (2017) plantea la evaluación de medidas a partir de su costo-efectividad, considerando simultáneamente variables económicas y de desempeño. El World Bank (2017) destaca la utilidad de indicadores como el periodo de retorno y la estimación de beneficios múltiples en la evaluación de proyectos de eficiencia en el sector público, mientras que guías específicas para edificios públicos subrayan el carácter costo-efectivo de las intervenciones en EE (EPEC, 2016).

En el ámbito de la eficiencia hídrica, la literatura evidencia que la viabilidad de estrategias como la captación de agua de lluvia depende en gran medida de la relación entre costos de

implementación y ahorros potenciales, lo que refuerza la pertinencia de enfoques simplificados para su análisis (Campisano et al., 2017). En complemento, otros estudios destacan la necesidad de establecer criterios de selección basados en el rendimiento y las condiciones locales para optimizar la toma de decisiones (Farreny et al., 2011). En conjunto, estos antecedentes respaldan la aplicación de metodologías sintéticas que permitan clasificar y priorizar intervenciones según su relación costo-beneficio en edificios escolares.

Para la elaboración de la Tabla 2, la clasificación del costo de las intervenciones se realizó mediante un criterio operativo, en función del tipo de acción requerida para su implementación. Se consideraron como de bajo costo aquellas medidas que no implican obra o requieren intervenciones menores, de costo medio aquellas que suponen el reemplazo o incorporación de equipamiento, y de alto costo las que involucran la implementación de sistemas o infraestructura específica.

Para el periodo de retorno de la inversión se definieron tres rangos de clasificación: corto (hasta 2 años), medio (de 2 a 5 años) y largo (más de 5 años), con el objetivo de facilitar la comparación entre medidas. Esta categorización se fundamenta en enfoques como los de IEA (2017) y el

World Bank (2017), que priorizan intervenciones con rápida recuperación de la inversión, especialmente en contextos de recursos limitados.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en los casos de estudio presentan concordancia con investigaciones desarrolladas en Argentina y América Latina, donde se ha evidenciado un bajo nivel de eficiencia hídrica en edificios educativos, asociado principalmente a la ausencia de sistemas de monitoreo, reutilización y gestión del recurso. En este sentido, el desempeño observado en las escuelas del Área Metropolitana de San Juan refleja problemáticas estructurales del sector público educativo, donde las limitaciones operativas y de mantenimiento condicionan la implementación de estrategias de eficiencia.

A nivel internacional, diversos estudios han demostrado que la incorporación de sistemas de reutilización de AG y AP puede reducir significativamente la demanda de agua potable en edificios, con valores de ahorro comparables a los obtenidos en este trabajo. En este marco, los resultados alcanzados refuerzan la validez de estas estrategias en contextos áridos, aunque su

Tabla 2
Estimaciones económicas de propuestas de mejora

Escuela	Medida	Costo	Ahorro (lts/año)	Recupero	Prioridad
CCU	Aireadores y control caudal	Bajo	57.200	Medio	Alta
	Reemplazo de inodoros eficientes	Medio	678.600	Medio	Alta
	Mingitorios secos	Medio	561.600	Medio	Alta
	Mejora de bebederos	Bajo	342.680	Corto	Muy alta
	Captación de agua de lluvia	Alto	2.186.936	Medio	Estratégica
	Reutilización AG	Alto	287.040	Largo	Media
	Riego eficiente	Medio	28.080	Largo	Baja
CS1R	Aireadores y control caudal	Bajo	68.380	Medio	Alta
	Reemplazo de inodoros eficientes	Medio	829.530	Medio	Alta
	Mingitorios secos	Medio	695.760	Medio	Alta
	Mejora de bebederos	Bajo	415.350	Corto	Muy alta
	Captación de agua de lluvia	Alto	7.363.680	Corto	Estratégica
	Reutilización AG	Alto	1.511.640	Medio	Alta
	Riego eficiente	Medio	56.160	Largo	Baja

Fuente: Elaboración propia, 2026.

implementación efectiva depende de factores económicos, institucionales y de gestión.

No obstante, el principal aporte del presente estudio radica en la aplicación integrada de la metodología MECSA en edificios escolares existentes en un contexto árido, incorporando además una evaluación costo-beneficio que permite priorizar intervenciones según su viabilidad. Este enfoque contribuye a superar abordajes exclusivamente técnicos, incorporando una dimensión operativa clave para la toma de decisiones en el sector público.

En particular, las medidas propuestas demuestran una alta capacidad de reducción del consumo, con beneficios diferenciados según el tipo de acción implementada y el tamaño de la escuela. En el caso del CCU, sumando el impacto de los cuatro criterios, el ahorro total proyectado representa un ahorro del 89% respecto al consumo actual. Las estrategias con mayor impacto fueron: la reutilización de AP y la incorporación de sistemas ahorradores de agua. En el caso del CS1R, el ahorro total estimado asciende a 9,3 millones de litros anuales, debido a la mayor superficie disponible para captación de AP y por la incorporación simultánea de múltiples estrategias. Los aportes más significativos, al igual que en el

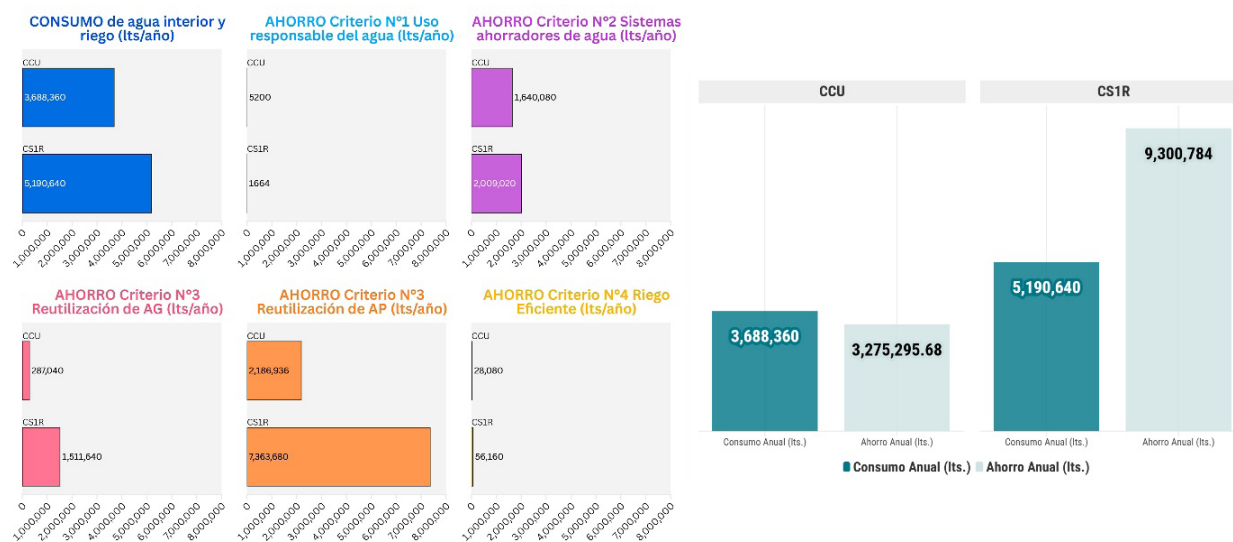
CCU, corresponden a la captación de AP y a los sistemas ahorradores de agua.

Las restantes estrategias, como la reutilización de AG, el riego eficiente y el uso responsable mediante monitoreo y mantenimiento, también aportan significativamente, aunque con valores menores en términos absolutos. No obstante, su implementación es fundamental para completar una estrategia integral de eficiencia hídrica, especialmente en contextos áridos como el de San Juan (ver Figura 9).

La incorporación de las estimaciones económicas permitió complementar la evaluación técnica de las propuestas, evidenciando diferencias significativas en la viabilidad de las distintas estrategias. En ambos casos de estudio, las medidas de bajo costo y rápido periodo de retorno (como la mejora de bebederos y la incorporación de dispositivos ahorradores) se posicionan como las intervenciones más convenientes, mientras que aquellas que implican mayor inversión, como la captación de agua de lluvia, presentan un carácter estratégico debido a su elevado impacto en el ahorro hídrico.

Por el contrario, algunas acciones, como el riego eficiente o la reutilización de AG en determinados escenarios, muestran periodos de

Figura 9
Síntesis del impacto de cada propuesta de mejora en el ahorro hídrico



Fuente: Elaboración propia, 2025.

recuperación más prolongados, lo que condiciona su implementación en el corto plazo. En este sentido, el análisis costo-beneficio refuerza la necesidad de priorizar intervenciones según su factibilidad económica y su impacto, aportando una dimensión operativa a la planificación de la eficiencia hídrica en edificios escolares. En esta línea, los resultados deben interpretarse considerando que la implementación de estas estrategias depende no solo de su factibilidad técnica, sino también de condiciones económicas, institucionales y de gestión que pueden limitar su adopción en el corto plazo.

CONCLUSIONES

El análisis de los dos casos de estudio del Área Metropolitana de San Juan evidenció un desempeño hídrico deficiente, caracterizado por la ausencia de monitoreo del consumo, la falta de sistemas de reutilización y la utilización de métodos de riego ineficientes. No obstante, la aplicación de la metodología MECSA permitió identificar un alto potencial de mejora, con ahorros estimados de hasta 3,2 millones de litros anuales en el CCU y 9,3 millones en el CSiR.

Las estrategias de mayor impacto corresponden a la captación de agua de lluvia y a la incorporación de sistemas ahorradores, mientras que el análisis costo-beneficio evidenció que las medidas de bajo costo y rápida implementación presentan la mayor viabilidad en el corto plazo. En este sentido, los resultados demuestran que es posible alcanzar mejoras significativas mediante intervenciones progresivas, adaptadas a las condiciones económicas e institucionales del sector público.

El estudio valida la metodología MECSA como herramienta de diagnóstico, planificación y priorización de intervenciones en edificios escolares, permitiendo no solo evaluar el desempeño hídrico, sino también orientar la toma de decisiones en contextos de recursos limitados. Asimismo, pone en evidencia que, aun partiendo de situaciones iniciales críticas (reflejadas en una calificación nula en la etapa de auditoría), la incorpo-

ración de estrategias de mejora puede generar avances sustanciales en el nivel de desempeño.

En un contexto de creciente escasez hídrica, optimizar el uso del agua en edificios educativos constituye una estrategia clave para reducir la presión sobre el recurso y contribuir al cumplimiento de objetivos ambientales y sociales, como el acceso al agua segura y la educación para la sostenibilidad. En este sentido, las escuelas se posicionan como espacios estratégicos tanto por su consumo como por su capacidad de promover prácticas responsables en la comunidad.

Finalmente, los resultados obtenidos son transferibles a otros establecimientos con características constructivas y condiciones climáticas similares, lo que refuerza su aplicabilidad a escala territorial. Como líneas futuras de trabajo, se propone profundizar en el estudio de los hábitos de uso del agua y en el desarrollo de estrategias participativas que fortalezcan la gestión sostenible del recurso en el ámbito educativo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Nacional de San Juan y al IRPHa-CONICET por la contribución en el financiamiento de la investigación.

REFERENCIAS

- Al-Shurafat, A. W., Talozi, S., Alhrahshah, T., Zaid, M., Paterson, E., Benramdane, A. y Afaneh, A. (2021). Realizing integrated wastewater/greywater management in Jordanian public schools. *Waterlines*, 40(4), 267–281. <https://doi.org/10.3362/1756-3488.21-00006>
- Antunes, L. N., Ghisi, E. Water and energy consumption in schools: case studies in Brazil. *Environ Dev Sustain* 22, 4225–4249 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00380-x>
- ASHRAE (2020). Heating, Ventilating and Air-Conditioning. Systems and Equipment. ASHRAE Editor, ISBN 1947192531.
- Ballari, A. P. y Cortizas, L. (2023). *Escenarios y realidades en torno a la gestión del agua en Argen-*

- rina (2000-2022). *Locale*, 7, 87-111. <https://doi.org/10.14409/RL.2022.7.E0004>
- Banu, D. A. S., Sheela, S., Muralimohan, N., Saranya, N., Kolar, A. B. y Santhya, V. S. (2023). Importance and Benefits of Green Audits to Education Institutions and Industrial Sectors. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(12), 349-356. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/V13I123690>
- BCA (2021). BCA Green Mark for existing schools. Versión 2.0. https://isomer-user-content.by.gov.sg/338/71511d79-2f27-4326-ab5b-6d03c06a9c7c/gmes_rev219818819c9b1417286f1c818414d3931.pdf
- BRE Global (2008). BREEAM Education 2008. Assessor Manual. <https://breeam.com/training>
- Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H. y Han, M. (2017). *Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives*. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>
- Carrier (1965). *Handbook of Air Conditioning System Design*, Vol. 1, McGraw-Hill, pp. 350. <https://es.scribd.com/doc/140526830/35768177-Carrier-Handbook-of-Air-Conditioning-System-Design>
- CCU (2025). Cronograma institucional 2025 del Colegio Central Universitario. <https://www.ccu.unsj.edu.ar/noticias/noticia/800>
- Colegio de Arquitectos de Córdoba (2018). Protocolo eSe. <https://cec-ciecs.com.ar/wp-content/uploads/2018/08/PROTOCOLO-ESE-MARCO-DE-REFERENCIA.pdf>
- DGNB (2020). DGNB System. <https://www.dgnb.de/en/certification/important-facts-about-dgnb-certification/about-the-dgnb-system>
- Dominguez, M. (17 de febrero de 2022). Los mejores tipos de grifería para ahorrar agua. <https://www.caloryfrio.com/bano-agua/griferia/tipos-de-griferia-y-dispositivos-para-ahorrar-agua.html>
- Elliott, S. (2024). How Dual Flush Toilets Work. HowStuffWorks. <https://home.howstuffworks.com/dual-flush-toilet.htm>
- EPEC (2016). Guidance on energy efficiency in public buildings. European Investment Bank. European PPP Expertise Centre. https://www.eib.org/files/epec/epec_guidance_on_energy_efficiency_in_public_buildings_en.pdf
- Especificar (21 de marzo de 2022). Truflush antivandálico de Sloan, haciendo un mundo de diferencia. <https://especificarmag.com.mx/truflush-antivandalico-de-sloan-haciendo-un-mundo-de-diferencia/>
- Farreny, R., Morales-Pinzón, T., Guisasola, A., Tayà, C., Rieradevall, J. y Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Research*, 45(10), 3245-3254. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.036>
- Ferrum (2021). Mingitorio seco Ferrum. <https://ferrum.com/mingitorio-seco-sva-mg-010-bl.html>
- Flores, R. A. y Ghisi, E. (2022). Water Benchmarking in Buildings: A Systematic Review on Methods and Benchmarks for Water Conservation. *Water*, 14(3), 473. <https://doi.org/10.3390/W14030473>
- GENEBRE (2025). Grifo de lavabo electrónico con sensor. https://pim.genebre.es/genebre/documentos/fichas_tecnicas/67123%2015%2045%2066.pdf
- Ghisi, E. y Freitas, D. A. (2024). Economic Feasibility of Rainwater Harvesting and Greywater Reuse in a Multifamily Building. *Water*, 16(11), 1580. <https://doi.org/10.3390/w16111580>
- Gobierno de San Juan (2021). Caracterización de la Provincia de San Juan. Plan estratégico San Juan. <https://planestrategico.sanjuan.gob.ar/wp-content/uploads/2021/03/Caracterizacion-San-Juan-Version-2021.pdf>
- Google Earth (2024). Colegio Central Universitario. https://earth.google.com/web/@-31.53732053,-68.54829168,656.31419667a,304.88400591d,35y,-7.57521398h,34.49789896t,or/data=CkQaPhI4CiUweDk2ODEoMDM-2MWEzZGEwODk6MHg1MjU4NjE5Yz-NjZDQoODQzKg9Db2xlZ2lvIENlbN-RyYWwYAiABQgIIAToDCgEwQgIIAEoN-CP_____wEQAA?authuser=0
- Google Earth (2024a). Colegio Superior N.º 1 de Rawson. [Año 10, núm. 20, julio-diciembre de 2026 / pp. 85-107 / VIVIENDA Y COMUNIDADES SUSTENTABLES/ ISSN 2594-0198 105](https://earth.google.com/web/@-31.57912519,-68.53228089,636.70661902a,241.20997187d,35y,0.66525576h,1.10109467t,or/data=CkUaPxI5CiUweDk2ODEzZmUoZ-GI4ZDYxZDU6MHg1OGRhZTRhM-mU2ZWQ3OTE3KhBDb2xlZ2lvIFN1cGV-</p>
</div>
<div data-bbox=)

- yaW9yGAIgAUICCAE6AwoBMEICCA BKD-Qj_____8BEAA?authuser=0
- GRIHA Council (2019). GRIHA for existing day schools. Versión 2.0. <https://www.grihaindia.org/sites/default/files/pdf/Manuals/griha-edobook.pdf>
- IBEC. (2014). CASBEE. Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency. <https://www.ibecs.or.jp/CASBEE/english/>
- IEA (2017). Cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation (Annex 56). IEA Energy in Buildings and Communities Programme. https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_PSR_Annex_56.pdf
- IFC (2021). Guía del usuario de EDGE. Versión 3.0. <https://bioconstruccion.com.mx/certificacion-edge/>
- IGBC (2016). IGBC Green Data Center. Rating System. Abridged Reference Guide. <https://igbc.in/igbcgreendatacenter/>
- IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- IRAM (2012). Norma IRAM 11603. Acondicionamiento térmico de edificios. <https://procesosconstructivos.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/08/iram-11603-e1.pdf>
- ITACA (2016). Protocollo ITACA Edifici Scolastici. <https://itaca.calabria.iisbeitalia.org/sites/default/files/Protocollo%20ITACA%20Edifici%20Scolastici.pdf>
- Khilchevskiy, V. (2020). Global Water Resources: Challenges of the 21st Century. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. *Geography*, 76-77, 6-16. <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2020.76-77.1>
- Lai, O. (26 de junio de 2020). Water Shortage: Causes and Effects. Climate Change. <https://earth.org/causes-and-effects-of-water-shortage/>
- Mahato, A., Upadhyay, S. y Sharma, D. (2022). Global water scarcity due to climate change and its conservation strategies with special reference to India: a review. *Plant Archives*, 22(1), 64. <https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2022.V22.NO1.009>
- Masia, T., Kajimo-Shakantu, K. y Opawole, A. (2020). A case study on the implementation of green building construction in Gauteng province, South Africa. *MEnvQ*, 31(3), 602-623. <https://doi.org/10.1108/MEQ-04-2019-0085>
- Ministerio de Educación (1998). Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar. <https://www.educ.ar/recursos/114117/criterios-y-normativa-basica-de-arquitectura-escolar>
- Miranda, O. (2015). El riego en la provincia de San Juan, Argentina: su dinámica institucional en los últimos dos siglos. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12(3), 385-408. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722015000300006
- Monge Redondo, M. A. (2019). Prontuario de diseño hidráulico para riego por goteo. <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/prontuario-diseno-hidraulico-riego-goteo-1a-parte>
- Naciones Unidas (2021). Special Report on Drought 2021. https://www.droughtmanagement.info/literature/UN-GAR_Special_Report_on_Drought_2021.pdf
- Naciones Unidas (2024). Agua. <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- OCU (2 de febrero de 2024). Reductores de caudal y economizadores de agua. <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/equipamiento-hogar/consejos/reductores-de-caudal-para-ahorrar-agua>
- Ogunnaike, A., Onosemuode, M. O., Osunkoya, O., Adewumi, J. B., Rabi, O., Orimijupa, O. D. y Dayomi, M. (2025). A comparative study of rainwater harvesting, greywater recycling, and water-efficient landscaping in buildings within Lagos Mainland Local Government Area of Lagos State, Nigeria. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, 9(7), 5558-5574. <https://doi.org/10.47772/IJRISS.2025.907000449>
- Ré, M. G. (2017). Arquitectura escolar: Análisis del Programa Nacional 700 escuelas en la provincia de San Juan. En XXXVI Encuentro y XXI Congreso de Escuelas y Facultades Públicas de Arquitectura del Mercosur. San Juan, Argentina. https://www.researchgate.net/publication/320300087_ARQUITECTURA_ESCOLAR_ANALISIS_DEL_PROGRAMA_NACIONAL_700_ESCUELAS_EN_LA_PROVINCIA_DE_SAN_JUAN
- Ré, M. G. y Bianchi, M. F. (2020). Metodología de evaluación y calificación de la sustentabilidad ambiental y la eficiencia energética en edificios escolares existentes. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 45, 39-49. <https://portalde->

- revistas.unsa.edu.ar/index.php/erma/article/view/1304
- Ré, M. G. y Michaux, M. C. (2023). Envoltorio y comportamiento térmico. Caso de estudio, edificio escolar en San Juan, Argentina. *Módulo Arquitectura - CUC*, 31, 147-166. <https://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.31.1.2023.06>
- Rodrigues, A. M., Formiga, K. T. y Milograna, J. (2023). Integrated systems for rainwater harvesting and greywater reuse: A systematic review of urban water management strategies. *Water Supply*, 23(10), 4112-4125. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.240>
- Schmidt, M. (2022). El cañito de la red llega, lo que no llega es el agua. Hacia una ecología política del agua en el Chaco salteño, Argentina. *Territorios*, 46. <https://www.redalyc.org/journal/357/35771093012/html/>
- Secretaría de Agua y Energía (2023). Plan de Gestión Integral de los Recursos Hídricos de la Provincia de San Juan. <https://hidraulica.sanjuan.gob.ar/sistemas/plan.php>
- Stoecker, W. F. y Jones, J. W. (1982). Refrigeration and Air Conditioning. McGraw-Hill, 2.^a Edition. <https://elsolucionario.net/refrigeration-and-air-conditioning-w-f-stoecker-j-w-jones-2nd-edition/?Do9LTByD=I2kqNy3>
- Subramanian, P. S. G., Raj, A. V., Jamwal, P., Connelly, S., Yeluripati, J., Richards, S., Ellis, R. y Rao, L. (2020). Decentralized treatment and recycling of greywater from a school in rural India. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101695. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101695>
- Teston, A., Ghisi, E., Martins Vaz, I.C., Scolaro, T.P. y Severis, R. M. (2024). Modular life cycle assessment approach: Environmental impact of rainwater harvesting systems in urban water systems. *Science of the Total Environment*, 907, 168060. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168281>
- U.S. Green Building Council (2018). LEED Versión 4.0 For Building Operations And Maintenance. In LEED V4 for Building Operations And Maintenance. <https://www.usgbc.org/leed/v4>
- UNESCO (2024). Imminent risk of a global water crisis warns the UN World Water Development Report 2023. <https://www.unesco.org/en/articles/imminent-risk-global-water-crisis-warns-un-world-water-development-report-2023>
- UNICEF (2018). Drinking water, sanitation and hygiene in schools: global baseline report 2018. <https://data.unicef.org/resources/wash-in-schools/>
- Voda (2025). Bebedero de exteriores Bi-Level con llenador de botellas. <https://vodaargentina.com/producto/bebedero-de-exteriores-bi-level-con-llenador-de-botellas/>
- World Bank (2017). Assessing and measuring the performance of energy efficiency projects. Energy Sector Management Assistance Program. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/144381608284310204/pdf/Assessing-and-Measuring-the-Performance-of-Energy-Efficiency-Projects.pdf>

Financiamiento.

La presente investigación no recibió financiamiento específico.

Conflicto de interés.

Los autores declaran no tener conflictos de interés en relación con la investigación, la autoría y/o la publicación del presente artículo.

Uso de inteligencia artificial.

Los autores declaran que no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa en la elaboración del manuscrito o, en su caso, que su uso se limitó exclusivamente al apoyo lingüístico y de redacción, manteniendo en todo momento la responsabilidad sobre el contenido y las conclusiones del trabajo.

Contribución de autoría.

Los autores participaron en la conceptualización, desarrollo, análisis y redacción del manuscrito, de conformidad con los principios de la taxonomía CRediT (Contributor Roles Taxonomy), y aprobaron la versión final para su publicación.

