

Energía imbuida e impacto ambiental De agua potable en Buenos Aires

Embodied energy and environmental impact Of drinking water in Buenos Aires

*John Martin Evans*¹

¹ Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

evansjmartin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3363-8855>

Fecha de recepción: 25 de noviembre de 2024

Fecha de aceptación: 15 de enero de 2025

DOI <https://doi.org/10.48204/2710-7426.6851>



RESUMEN: El presente trabajo establece la energía imbuida de agua necesaria para los procesos de extracción, potabilización y distribución, sumando el consumo en bombeo y tratamiento de aguas servidas que complementan este suministro. Se analiza el caso de agua potable en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y su Regional Metropolitana. La demanda de energía permite calcular las correspondientes emisiones de gases efecto invernadero. Además, se estima la relación inversa, el agua necesaria para generar electricidad hidroeléctrica según el volumen que pasa por las turbinas y el agua perdida por evaporación en las represas. Luego se compara la energía imbuida de agua suministrada a una vivienda típica en la región del estudio con la energía convencional utilizada en la misma vivienda. Finalmente, se establece la relación entre la demanda de agua de una vivienda y el potencial recurso de agua de lluvia, a fin de reducir los impactos ambientales. El estudio muestra que la energía imbuida de agua representa aproximadamente 8 % de la demanda de energía eléctrica del sector residencial y 2 % de la energía total de vivienda en la zona de estudio, proporción que aumentará cuando se implementen medidas de eficiencia energética. La discusión final muestra que el aumento de la variabilidad pluvial en zonas de creciente déficit hídrico y el crecimiento de la demanda tenderá a incrementar la energía imbuida del agua.

PALABRAS CLAVES: Agua potable, energía imbuida, infraestructura urbana, huella energética, huella hídrica.

ABSTRACT: The present paper establishes the embodied energy of water, the amount of energy needed for the extraction, purification and distribution, adding the pumping and treatment of wastewater, which complements the water supply. It analyses the case of the drinking water supply in the Autonomous City of Buenos Aires and its Metropolitan Region. The conventional energy demand allows the calculation of the corresponding greenhouse gas emissions. The paper also estimates the inverse relationship, the water needed to generate electricity based on the volume passing through the hydroelectric turbines and the water lost in evaporation from the reservoirs. Next, the study compares the embodied energy of water supplied to a typical dwelling in the study region with the conventional energy used in the same dwelling. Finally, the typical water demand of the housing sector in the study region is compared with the rainwater resource to evaluate possible reductions of environmental impacts. The study shows that the embodied energy of water corresponds to 8 % of typical residential electrical energy demand, and 2 % of the total energy demand of this sector, a proportion that will increase when implementing energy efficiency measures. The final discussion shows that growing climatic variability and increasing demand will tend to reduce water availability in some zones and intensify the embodied energy of water.

KEYWORDS: Drinking water, embodied energy, urban infrastructure, energy footprint, water footprint.

1. INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable, derecho internacionalmente reconocido por Naciones Unidas [1] y el mejoramiento de su distribución son dos metas condicionantes de relevancia, ya incorporados en los ODS, Objetivos del Desarrollo Sustentable de Naciones Unidas [2]. En ese contexto, el Objetivo 6, Agua Limpia y Saneamiento, propone mejorar el acceso al agua limpia a 785 millones de personas que no contaban aun con servicios básicos de agua potable en 2017 [3]. El uso racional de agua potable contribuye a la sustentabilidad en edificios y merece una importante puntuación en los sistemas de certificación, tales como LEED [4] y BREEAM [5]. Sin embargo, como se demuestra en este trabajo, el proceso de provisión de agua potable para mejorar la calidad de vida también requiere importantes y crecientes recursos energéticos mientras genera impactos ambientales significativos.

En ese contexto, el presente trabajo surge de estudios realizados con el fin de identificar las condiciones necesarias para promover ‘Vivienda Energía Cero’ [6 y 7] y de muy baja demanda, considerando que, con mayor eficiencia energética, las demandas y emisiones que fueron considerados mínimos en el pasado, actualmente revisten mayor importancia y urgencia.

La definición de ‘viviendas energía cero’ contempla un balance energético anual cero de la energía que cruza los límites de la parcela de una vivienda, Alcance 1, y la energía utilizada para generación y transporte de la energía secundaria, Alcance 2. La energía y las emisiones de Alcance 1 corresponden al uso dentro de la propiedad, mientras que el Alcance 2 incluye la energía y emisiones necesarias para generar, procesar y entregar la energía. Este trabajo identifica la energía y las emisiones correspondientes a la extracción, potabilización y distribución de agua potable para vivienda y otros edificios, utilizando el caso de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y el Gran Buenos Aires, CABA y GBA.

Varios estudios cuantifican la demanda de agua para producir materiales [8], conocida como ‘agua imbuida’, ‘agua virtual’ o ‘huella hídrica’ de los procesos de cultivo, producción y fabricación. La Norma ISO 14046:2014 [9] y Hoekstra et al [10] indican la metodología para establecer esta variable. Los siguientes datos del agua imbuida de materiales son indicativos de la importancia de este concepto, especialmente en el marco del cambio climático y el calentamiento global, dada la creciente escasez prevista en zonas con déficit hídrico, con mayor variabilidad del régimen de lluvias o dependencia en agua de deshielo. Por ejemplo, se requieren 15 m³ de agua para producir 1 kg de carne (riego, alimentos, limpieza, etc.), 24 m³ para 1 kg de chocolate, 0,2 a 0,3 m³ para 1 kg de papel, y 1,5 m³ para 1 kg de harina de trigo

[10. 11]. Cabe notar que los materiales de la construcción también requieren agua para su fabricación,

En este trabajo se plantea la relación inversa, analizando los recursos energéticos directos necesarios para suministrar agua potable, a fin de definir la energía imbuida de agua que se suministra a las viviendas y otras edificaciones, evaluar su incidencia en la demanda energética del sector y estimar su impacto ambiental.

2. OBJETIVOS

Este trabajo analiza distintos impactos del agua potable, la cantidad de energía necesaria para su producción y los impactos generados en ese proceso. Se establece también el caudal de agua necesaria para generar energía eléctrica en centrales hidroeléctricas y el agua perdida en el proceso de esta generación. Además, se indican los impactos de GEI, gases efecto invernadero, debido al uso de energía y las emisiones adicionales producidas por el tratamiento de aguas servidas. Finalmente, se estima la incidencia del agua en la matriz energética en el sector residencial y se analiza la posibilidad de aprovechar agua de lluvia en vivienda de baja altura y en conjuntos de baja densidad para reducir los impactos.

En ese contexto, el trabajo analiza y establece las siguientes relaciones entre la demanda de agua potable y energía en la edificación, Figura 1:

- **Huella energética o energía imbuida del agua:** es la demanda de energía para extraer, potabilizar y distribuir agua en kWh/m³. Este trabajo incluye la energía para tratar las aguas servidas, un resultado del uso de agua en la edificación.
- **Volumen de agua para generar energía hidroeléctrica:** Aquí se adopta uno de dos posibles criterios:
 - Criterio 1:** el número de metros cúbicos de agua para generar un kilowatt/hora en una central hidroeléctrica, con los valores netos, metros cúbicos que pasan por turbinas, y bruto, el volumen total que pasa por turbinas y vertedores, sin pérdida de agua, con pérdida de su energía potencial.
 - Criterio 2:** el volumen de agua perdido en la generación de energía hidroeléctrica implica la reducción de agua disponible después de generar un kilowatt hora en una central hidroeléctrica, resultado de la evaporación de agua y el proceso constructivo.
- **Impacto ambiental del agua:** son los gases efecto invernadero emitidos en la provisión de agua potable y el tratamiento de aguas servidas.
- **Energía imbuida del agua en la matriz energética de la vivienda:** es la demanda de energía imbuida de agua usada en una vivienda comparada con la demanda de energía

convencional, por ejemplo, electricidad, gas y otros combustibles.

- **Balance hídrico:** es el potencial de responder a la demanda residencial promedio de agua de una unidad de vivienda, considerando la precipitación anual disponible según la superficie de captación disponible o la potencial ‘cosecha pluvial’.

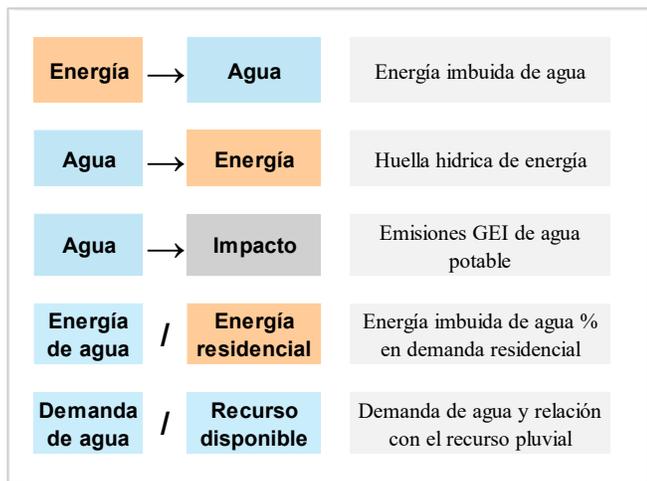


Figura 1. Objetivos del trabajo: establecer la energía imbuida del agua, el agua imbuida de la energía, el impacto ambiental del agua, la energía imbuida del agua como proporción de los servicios energéticos entregados a la vivienda y la posibilidad de aprovechar el recurso pluvial.

3. METODOLOGÍA

La demanda de agua potable, la disponibilidad de agua dulce, el régimen hídrico y la disponibilidad de energía son muy variables geográficamente y la demanda de energía para potabilización depende de las condiciones locales. Así, este estudio analiza el caso de Buenos Aires, la Ciudad Autónoma y la Región Metropolitana, en la zona con agua suministrada por AySA, Aguas y Saneamiento Sociedad Anónima, Argentina.

En ese marco, este trabajo analiza la ‘energía imbuida’ EI, de agua potable, estimando la cantidad de energía necesaria para extraer, tratar y distribuir agua de red para consumo doméstico, basada en la información de la empresa AySA, responsable de la entrega de agua potable y tratamiento de aguas servidas [12,13]. La energía imbuida de agua presenta características distintas a la EI de materiales de construcción, dado que la EI de agua es un flujo medido en litros o metros cúbicos por día, mes o año, mientras la EI de los materiales corresponde casi totalmente a la etapa inicial de construcción. Por ello, el trabajo compara la EI de agua con la entrega gas y electricidad a través de las redes urbanas de energía convencional.

Los sistemas de potabilización y distribución urbana de agua integran los conocimientos provenientes del análisis biológico y químico, combinado con la tecnología hidráulica de canalización y bombeo, inicialmente con máquinas a vapor, y hoy con bombas eléctricas. En Buenos Aires, las primeras grandes plantas urbanas de tratamiento utilizaron agua proveniente directamente del Río de la Plata, suplementándolo con agua de pozo en zonas suburbanas, fuera de la red inicial de distribución de agua potable. Por otro lado, las aguas servidas urbanas, originalmente depositadas en arroyos y el mismo Río de la Plata, fueron conducidas a la planta de tratamiento en Berazategui y, posteriormente, a una planta adicional en Florencio Varela. En zonas suburbanas, fuera de la red cloacal, se recibían las aguas servidas en pozos negros o cámaras de tratamiento anaeróbico en cada lote. Hoy, la mayoría de los consumidores en la zona urbanizada cuentan con suministro de agua potable y cloacas, con un 96 % de cobertura de agua potable y 87 % de cloacas [13], Tabla 1.

Cabe notar que, en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, los principales consumidores de energía eléctrica son el Gobierno Nacional, el Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y la Universidad de Buenos Aires, en todos los casos con múltiples edificios y puntos de suministro. Sin embargo, en la región metropolitana (incluyendo la Ciudad Autónoma), AySA es el principal consumidor de energía eléctrica con una demanda total de 784.867 MWh durante 2022 y 803.00 en 2023 [12 y 13]. En 2017, AySA contaba con 1248 puntos de suministro, que aumentó a 1509 en 2022. Según el Informe Anual 2022 [12], 10 % del presupuesto de AySA total corresponde a la adquisición directa de energía, sumando la energía renovable propia y energía indirecta en rubros tales como mantenimiento de las redes, servicios contratados y transporte de personal, a los cuales se agrega la energía imbuida de los insumos, especialmente cloro y otros químicos.

Tabla 1. Usuarios registrados, servicio de agua potable y desagües cloacales, Región Metropolitana de Bs.As. y CABA, 2022.

Servicio	Usuarios	%
Agua potable y desagües cloacales	3.021.388	79,50%
Solamente agua potable	622.165	16,40%
Solamente desagües cloacales	156.350	4,10%
Total servicio de agua potable	3.643.553	95,90%
Total servicio de desagües cloacales	3.177.738	85,60%
TOTAL	3.799.903	100%

Elaboración propia con datos de AySA [12]

En Argentina, la Ley Nacional 27191/15 exige que los grandes consumidores de energía eléctrica obtengan una proporción del total de fuentes renovables, ya se trate de instalaciones propias o de terceros. El Reporte de Sustentabilidad 2023 de AySA [13] indica la participación de

energía renovable en el suministro total de energía eléctrica de la empresa, que proviene de tres fuentes:

- generación de energía eléctrica con instalaciones fotovoltaicas propias.
- contratación de energía renovable de proveedores externos.
- energía renovable contratada a través de CAMMESA, Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima.

AySA cuenta con 25 contratos de suministro de energía renovable, de los cuales 11 corresponden a contratos directos y 14 en compras realizadas en forma conjunta a través de CAMMESA, la distribuidora mayorista de energía en Argentina. Estos últimos cubrieron el 19 % de la demanda del año 2022 con una leve reducción en 2024 por la baja potencia del viento. Actualmente, AySA planifica aumentos adiciones de energía renovable. En total, el suministro anual de energía eléctrica renovable fue 83.665 MWh, superando el mínimo legal de 18 % según AySA [12]. Cabe aclarar que las fechas para cumplir con el mínimo de 18 % fueron demoradas como resultado del impacto del COVID y la situación económica. Los contratos de compra de energía renovable resultan económicamente favorables debido al precio estable y un valor medio significativamente menor que el precio vigente de CAMESSA [14].

La Tabla 2 indica la energía eléctrica utilizada para extraer, potabilizar y distribuir agua potable para los consumidores con conexión a red en el área del servicio de AySA, con valores totales y parciales para la producción y distribución de agua potable y el transporte y tratamiento de aguas cloacales.

Cabe aclarar que casi 83 % corresponde a agua potable, el 15 % a aguas cloacales y el 1,7 % a la administración. Adicionalmente, AySA utiliza gas de red, con 56 puntos de suministro, cantidad muy reducida que corresponde principalmente a calefacción, agua caliente, cocción en edificios administrativos y consumo en laboratorios.

Tabla 2. Energía eléctrica utilizada para potabilizar y bombear agua potable y tratar aguas servidas, 2022.

Uso de energía eléctrica	MWh	%	%
Energía convencional	701.202	100%	
Energía renovable contratada	83.665	10,6%	
Energía renovable propia	30.773	4,4%	
Energía renovable entregada	26.646	3,8%	
Total energía renovable	141.084	18,8%	
Producción de agua	326.669	41,6%	Potable
Transporte (bombeo y control)	321.700	41,2%	82,8 %
Transporte de aguas cloacales	66.352	8,4%	Cloacal
Tratamiento aguas cloacales	55,023	7,0%	15,4 %
Administración	13,091	1,7%	
Energía eléctrica total	784.867	100,0%	

Fuente: AySA [12 y 13] La energía renovable entregada corresponde a la proporción que entrega CAMMESA sin contrato directo.

La población del área de concesión de AySA corresponde al 33 % de la población total de Argentina, mientras que la población con servicio de agua potable de AySA alcanza 25 %. Cabe notar que las estadísticas de AySA se refieren al 'Área de Concesión' que no coincide exactamente a la delimitación de AMBA, Área Metropolitana de Buenos Aires, sumado a la jurisdicción de CABA. Tampoco coincide con la zona censal de los 28 Partidos de Buenos Aires del INDEC [15]. Por lo tanto, se ha considerado un total de 14.975.514 habitantes en el área de concesión de AySA, donde el 75 % cuenta con servicio de agua potable. La población total con servicio de agua potable en 2022 fue de 11.238.106 habitantes, con un promedio de 3,36 personas por conexión residencial, mientras que el número de personas por hogar, según el INDEC, es 2,8 debido a la diferencia entre la definición de 'conexión' de agua y 'hogar', la unidad censal. Adicionalmente, cabe aclarar que el área de concesión de la distribuidora de agua no coincide exactamente con la zona de cobertura de las empresas distribuidoras de gas o electricidad.

AySA produce 5199895 m³ de agua potable por día y entrega 792 litros por día a cada usuario residencial en la zona de cobertura con 235 litros de consumo por persona, Tabla 3.

Esta cifra excluye el 40 % de consumo no autorizado, no comercializado, con pérdidas de cañerías y tareas de mantenimiento, descargas controladas y extracción sin cargo por bomberos, riego permitido, y entrega sin cargo a municipalidades [12]. En 2022, el volumen promedio de agua suministrada por AySA en total fue 5.199.895 m³/día.

En 2023 presentaba un valor similar, con una importante proporción por pérdidas, y solamente 3.110.851 m³/día corresponde a agua potable entregada a los usuarios.

Tabla 3. Número de usuarios con servicio de agua, 2022.

Categoría de usuario	Numero	%	Volumen m ³
Residencial (con tarifa social)	3.338.417	86,8%	2644784
Tarifa social residencial	163.301	4,3%	
No residencial	348.431	9,2%	466067
Tarifa social no residencial, comedores, clubes, etc.	3.540	0,1%	
Baldío	113.055	3,0%	
TOTAL			3.110.851
Suministro de agua medida	770.140	20,3%	
Suministro sin medidor	3.029.763	79,7%	

Fuente: AySA [12].

La energía eléctrica adquirida por AySA en el mismo año fue 784.867 MWh. Así, la energía necesaria para extraer, potabilizar y distribuir un m³ de agua resulta 0,414 kWh. Sin

embargo, la cantidad de energía para entregar un m³ a los consumidores, tomando en cuenta las pérdidas, es 0,691 kWh.

Con 3,36 personas por conexión residencial y un consumo de 235 litros por persona, se obtiene una demanda anual de 59,5 kWh por persona para el servicio de agua potable. Con los datos del BEN, el Balance Energético Nacional de Argentina [16] y la población según INDEC [15], se obtiene una demanda de energía eléctrica del sector residencial de 704,5 kWh por persona por año.

De este modo, la demanda de energía eléctrica para entregar agua representa 8 % adicional en la demanda de energía eléctrica del sector residencial.

Emisiones

La energía eléctrica utilizada para extraer, potabilizar, y distribuir agua genera emisiones de gases efecto invernadero. El factor de emisiones de un kWh de energía eléctrica es 0,429 kg de CO_{2e} [17], considerando la energía imbuida de agua, la energía eléctrica utilizada en el procesamiento de un metro cubico emite 0,295 kg de CO_{2e}. Con una demanda de energía eléctrica de 59,5 kWh por persona por año, las emisiones GEI correspondientes al suministro de agua son 25.5 kg de CO_{2e}.

Dado que AySA genera o contrata una proporción de su energía de fuentes renovables, el impacto ambiental del uso de agua disminuye a 21,7 kg por persona por año. Estas emisiones incluyen la electricidad utilizada para tratar y bombear aguas cloacales. Sin embargo, es necesario sumar las emisiones generadas en las plantas de tratamiento con importantes emisiones de metano, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno [18].

Estas emisiones están incluidas en el inventario nacional de gases efecto invernadero en el rubro 'Tratamiento y eliminación de aguas residuales' [18] y corresponde a aproximadamente al 4 % de las emisiones nacionales, excluyendo agricultura.

Huella hídrica de la energía.

Adicionalmente a la evaluación de la huella energética de agua y sus impactos, este estudio considera la relación inversa, la huella hídrica de la energía. La primera mide la energía eléctrica en kilowatt horas, necesaria para suministrar un litro o metro cubico de agua de agua potable, mientras que la segunda es el volumen de agua necesario para generar un kilowatt hora de energía eléctrica.

En Argentina, la energía hidroeléctrica, excluyendo la mini hidráulica que corresponde a la categoría 'energía renovable nueva', suministra 20,8 % de la energía eléctrica disponible [16]. La producción en las 8 represas hidroeléctricas más grandes de Argentina alcanza 86 % de hidroelectricidad del país incluyendo las centrales hidroeléctricas binacionales de Salto Grande y Yaciretá [13], Tabla 4. La cantidad de agua

necesaria para generar energía eléctrica en una represa hidroeléctrica depende en parte de la diferencia de nivel.

Las represas en ríos de llanura con limitada caída, tales como Yaciretá y Salto Grande, requieren 20 a 30 m³ de agua para generar un kWh, mientras Alicurá y Piedra de Águila requieren aproximadamente 3,7 m³ para generar la misma cantidad de energía eléctrica. Si bien la variable relevante es la energía potencial de un volumen de agua, en este caso se considera la cantidad de agua necesaria para generar electricidad, según el criterio de agua imbuida de Mannan y Al-Ghamdi [8] o 'agua virtual' de Antonelli y Sartori [21]. Otra preocupación a atender es la tendencia de reducir el caudal y la cantidad de agua debido al impacto del calentamiento global en agua de deshielo proveniente de la Cordillera [16].

Así, el volumen de agua corresponde a la cantidad neta que pasa por las turbinas, sin considerar el volumen que atraviesa el vertedor, lo cual duplica el volumen aproximado de agua. En promedio, un metro cubico de agua genera 0,128 kWh, considerando el promedio ponderado por el aporte de energía de cada represa, Tabla 4, o 0,064 kWh con el volumen total. Cabe notar que el agua que pasa por las turbinas no se pierde y se encuentra disponible aguas abajo para su uso.

Vanham et al [22] (2019) utiliza otro criterio para hidroelectricidad, considerando que la cantidad de agua utilizada y su energía potencial corresponde a las pérdidas por evaporación y a la construcción de la represa, las turbinas y componentes complementarios. La Tabla 5 indica la huella hídrica de varias fuentes en Europa.

En Argentina, cabe notar que las represas de la Patagonia, Alicurá, Piedra de Águila, Pichi, Chocón y Cierro Colorado, se encuentran en clima desértico con fuerte radiación solar y altos niveles de evaporación. Además, la misma cantidad de agua pasa por varias represas, mientras que Yaciretá y Salto Grande se localizan en zonas de clima cálido húmedo con menor tasa de evaporación, aunque las superficies de agua en las represas son extensas. Así, se considera que la evaporación promedio nacional es similar o mayor a los valores europeos, con una pérdida de agua dulce (también denominado 'agua azul') con aproximadamente 0,033 m³ de agua utilizada cada kWh [20].

Tabla 4. Volumen de agua y generación eléctrica de las principales represas de Argentina.

Represa	m ³ /s	millones m ³ /año	GWh/año	kWh/m ³	m ³ /kWh
Alicurá	241,9	7607,6	2096	0,276	3,63
Piedra de Águila	619,4	19.479,8	5174	0,266	3,8
Pichi	615,7	19.363,5	1060	0,055	18,3
Chocón	465,7	14.646,1	2182	0,149	6,7
Cerro Colorado	276,5	8.695,8	1583	0,182	5,5
Futaleufú	265	8.334,1	2945	0,353	2,8
Yaciretá *	11574	36.399,8	18033	0,05	20,2
Salto Grande *	3216	10.114,1	3190	0,032	31,7

Fuente: elaboración propia con datos de CAMESSA, 2023. [18]

* Nota: 50 % de la generación de las represas binacionales corresponden a Argentina, aunque Uruguay y Paraguay venden a Argentina una proporción de su propia energía.

Tabla 5. Huella hídrica de distintos fuentes de energía en Europa.

Tipo de energía	m ³ / TJ	m ³ / kWh	Comentarios
Eólica	1	0	Mínima demanda de agua. materiales
Solar	117	0,0004	Materiales y construcción
Gas	136	0,0005	Uso, agua de enfriamiento
Nuclear	627	0,0023	Uso, agua de enfriamiento, combustible
Hidro	9114	0,0328	Evaporación de la represa y construcción

Fuente: elaboración propia con datos de Figura 1 de Vanham et al [22]

Las centrales térmicas y nucleares a gas también requieren grandes cantidades de agua para enfriar el vapor y, si bien no se altera la calidad, el aumento de la temperatura puede afectar los ecosistemas acuáticos, mientras que en las represas hidroeléctricas la temperatura del agua no cambia significativamente, aunque el agua puede perder sólidos en suspensión reduciendo nutrientes disponibles aguas abajo.

Oportunidades del Uso Racional de Agua.

El suministro de agua potable en Buenos Aires, Argentina, con una entrega de 235 litros por persona por día, es elevada comparado con otros países de la región y promedios mundiales o recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud. La Tabla 6 presenta valores indicativos del consumo diario en diferentes países, con el promedio mundial estimado, valores recomendados y valores mínimos indicados por el mismo organismo [23].

Estos valores indican un importante potencial para reducir la demanda de agua en el sector residencial del área en estudio, con los correspondientes beneficios económicos y ambientales.

Tabla 6. Demanda de agua por persona

Jurisdicciones	Litros / persona día	m ³ / año por persona	Notas y referencias
Estados Unidos	382	138,7	
Argentina (AMBA)	(bruta) 336 (neta) 235	122	Datos de AySA [12]
Sudáfrica	233	84,6	Clima similar a Argentina
Ciudad de Panamá	198		Residencial, 2008
Brasil	190	69	
Perú	180	65,3	
Reino Unido	142	51,5	Meta: 119 litros/día
España	137	49,7	
China	90	32,7	
Promedio mundial	173	62,8	
Recomendación OMS	120	43,6	UN-OHCHR [23]
Mínimo, salud OMS	50 - 100	18,2–36,4	UN-OHCHR [23]
Vivienda del autor	191	69,3	Con medidor (2023)

Datos indicativos de distintas fuentes, excluyendo agua no residencial.

4. DISCUSIÓN

El caso de Buenos Aires presentado en este trabajo corresponde a una zona geográfica plana con muy limitada variación de altimetría y favorable acceso a agua dulce. La demanda de agua será significativamente mayor en zonas con limitado acceso a recursos hídricos que requieran bombeo por tener recursos hídricos a mayor profundidad o distancia, mientras una mayor concentración de sales o polución requiere mayor energía de procesamiento. Si bien actualmente la proporción de energía imbuida de agua en Buenos Aires es relativamente reducida, adoptar medidas de mayor eficiencia energética y reducción de emisiones pueden mejorar el valor significativamente. En otras regiones con topografía desfavorable y mayor demanda de potabilización, la energía imbuida de agua ya presenta mayor importancia.

La comparación con estudios en otras regiones se complica debido a las variaciones en la eficiencia de la infraestructura, las condiciones de redes de distribución, la disponibilidad y calidad de agua, y la variación de la topografía y condiciones climáticas.

Los criterios adoptados también varían, generando importantes diferencias en los valores. Por ejemplo, según Melton [24] la energía total utilizada para entregar y tratar agua potable a nivel mundial es alrededor de 3 a 5 %, mientras la Alianza para el Ahorro de Agua [25] indica una cifra menor de 2-3 %. A su vez, Negi y Chandel, en un estudio de energía imbuida en India [26] obtienen proporciones similares a este estudio entre energía de la entrega de agua potable y el tratamiento de agua servidas.

Sin embargo, las emisiones son mayores debido al uso de cámaras sépticas, y un mejor trabamamiento puede reducir las emisiones, pero aumentan el uso de energía.

Hammond y Jones [27] en su amplio estudio de la energía imbuida de materiales de construcción, con datos de fuentes europeas, proponen un valor promedio de 0.278 kWh, pero no incluye la energía de tratamiento. Según un estudio de la Universidad de Florida, Estados Unidos, la energía imbuida es 2,906 kW/m³, valor 4 veces mayor al presente estudio, principalmente debido a la alta demanda de energía para bombeo con extracción de pozos de mayor profundidad o con importantes diferencias de nivel, sumado a tratamientos de potabilización más complejos para eliminar nitrógeno y otras formas de polución [25].

Otro factor que no se incluye en este análisis es la demanda adicional de energía requerida para bombeo en la edificación, especialmente edificios en altura. Si bien esta energía eléctrica está incluida en las facturas de inmuebles unifamiliares, en propiedades multifamiliares o condominios está comprendido como parte de las expensas comunes, difícil de identificar y cuantificar en relación a cada unidad de vivienda sin medidor.

En el futuro, tres tendencias pueden dificultar el suministro de agua potable en zonas urbanas:

- el crecimiento del área urbana y la población en ciudades.

- la tendencia de aumentar la demanda de agua por persona.
- la mayor variabilidad en el régimen de lluvias relacionadas con el cambio climático.

Todos estos factores pueden inducir mayor demanda de energía para extraer, potabilizar y distribuir agua, aumentando la energía imbuida del agua y los correspondientes impactos ambientales. También se puede prever un aumento en la competencia entre distintas demandas de agua, especialmente la destinada a usos urbanos y cultivos.

Finalmente, este estudio compara la demanda de agua de una vivienda con el recurso de agua pluvial. Como indica la Tabla 6, en la Región Metropolitana de Buenos Aires la demanda anual de agua potable del sector residencial es, en promedio, 235 m³ por persona. Una vivienda con una instalación separada de agua no potable, utilizada para la descarga de inodoros y riego de jardines, puede reducir la demanda de agua potable en aproximadamente 30 %. Así, en una vivienda unifamiliar con 4 personas, la demanda para usos no potables es aproximadamente 70 m³ por año.

En Buenos Aires, con una precipitación anual de 1250 mm en promedio, y superficie de captación en un techo de 56 m², se puede satisfacer la demanda, pero es necesario aumentar la superficie para responder a la variabilidad en el tiempo, la evaporación, el descarte de la primera recolección para reducir polvo arrastrado, etc. Aun con un depósito de agua de gran volumen para acumular agua de lluvia intermitente y un techo de 100 m², resultará difícil alcanzar una reducción de 20 % de la demanda de agua potable. En este caso, dado el costo de un sistema separado, los requisitos de mantenimiento y la amplia disponibilidad de agua dulce, el aprovechamiento de la cosecha pluvial presenta limitada factibilidad económica.

Adicionalmente, las autoridades municipales no priorizan los sistemas duales de agua, potable y no potable, en el sector de vivienda, debido a posibles problemas de conexiones equivocadas en reparaciones y mantenimiento. En edificios industriales, con mano de obra calificada de mantenimiento, manuales de funcionamiento, instalación de cañerías de distintos colores para identificar diferentes sistemas y el uso de colorantes para el suministro de agua pluvial no potable, se logra mayor posibilidad de aceptación y factibilidad de uso.

5. CONCLUSIONES

Los principales resultados de este estudio, Tabla 7, introducen nuevos factores en el análisis de la demanda de energía del hábitat construido. Adicionalmente a la energía en uso y la energía imbuida en los materiales de construcción del sector residencial y de otras edificaciones, se agrega la energía imbuida de agua potable.

A diferencia de la energía imbuida de los materiales de construcción, que ocurre en la etapa inicial del proceso constructivo, el uso de agua es constante durante la vida útil del inmueble, dada la demanda continua con las consecuentes emisiones de gases efecto invernadero.

En la zona de concesión de AySA, la demanda de energía eléctrica representa un componente significativo en la matriz de energía eléctrica. En ese marco, este trabajo aplica una metodología para estimar la energía imbuida de agua potable en la zona de distribución de AySA en la Región Metropolitana de Buenos Aires, la cual representa el 33 % de la población total del país.

Tabla 7. Resultados principales del estudio.

Variable	Resultados
Energía imbuida de agua, CABA y GBA (AySA) con pérdidas, etc.	0,414 kWh /m ³
Energía imbuida de agua, CABA y GBA (AySA) neta.	0,691 kWh / m ³
Agua imbuida de energía, grandes represas hidroeléctricas promedio, Argentina.	7,8 m ³ /kWh
Agua imbuida de energía, represas hidroeléctricas de llanura promedio.	20 a 30 m ³ /kWh
Agua imbuida de energía, represas hidroeléctricas de Patagonia promedio.	3,7 m ³ /kWh
Perdida de agua por evaporación en represas hidroeléctricas (Europa).	0,033 m ³ /kWh
Emisiones GEI de agua potable, por uso electricidad promedio nacional .	0,17 kg CO ₂ e/m ³
Emisiones GEI de agua servida total, electricidad y metano, etc.	0,20 kg CO ₂ e/m ³
Energía imbuida de agua como % de la demanda eléctrica y total en vivienda.	8 % energía eléctrica 2 % energía total

Dado que la cantidad de energía necesaria para extraer, potabilizar y distribuir agua potable es 252 kWh por metro cúbico, en promedio, la energía imbuida de agua potable neta representa casi 2 % de la energía total entregada al sector residencial y 8 % de la energía eléctrica.

Este porcentaje crece en viviendas con mayor eficiencia, por ejemplo, en unidades con 30 % de reducción de la demanda de energía convencional. Este valor fue obtenido de estudios realizados en conjuntos de vivienda social en 8 regiones del país con distintas condiciones bioambientales, mostrando que el porcentaje de la huella energética de agua aumenta a 3 % de la energía entregada o 10 % de la energía eléctrica.

Como dato comparativo, la demanda de energía imbuida de agua en los Estados Unidos alcanza a 3 a 4 % del consumo total de energía eléctrica, pero difiere la matriz energética.

El estudio también analiza la huella hídrica de energía, factor de creciente preocupación debido a posibles cambios en la disponibilidad del recurso como resultado del cambio climático y el calentamiento global. A tal fin se consideran dos criterios: 1. el volumen de agua necesaria para generar energía en las turbinas de centrales hidroeléctricas y 2. las pérdidas de agua debido a la evaporación en las represas. Dado que un metro cúbico de agua genera 0,128 kWh, se requieren 7,8 metros cúbicos para generar 1 kWh de hidroelectricidad. Al mismo tiempo, considerando las pérdidas de agua por evaporación, la reducción de agua dulce es aproximadamente 0,033 m³ por cada kWh generado.

Este estudio evidencia la importancia de relacionar ambos recursos, energía y agua, indicando la necesidad de incluir la gestión del agua y adoptar medidas de uso racional en el marco de estrategias de diseño y construcción que contribuyan a reducir las emisiones de gases efecto invernadero y aportar al desarrollo de un hábitat edificado más sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco de investigaciones de la Maestría ‘Sustentabilidad en Arquitectura y Urbanismo’ y del Centro de Investigación Hábitat y Energía, de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires.

REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas (2010) El derecho humano al agua y el saneamiento, Resolución 64/292 adoptado por la Asamblea General el 28 de julio de 2010.
- [2] Naciones Unidas (2015) Agenda 2030, Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015, Naciones Unidas, Nueva York. [Online] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/> [enero 3, 2025].
- [3] Naciones Unidas (2019) Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, Naciones Unidas, Nueva York, [Online] https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019-Spanish.pdf?_gl=1*juc3lu*_ga*MTYxMTMxNDk1N1C4xNj13NjYzNjc2*_ga_TK9BQL5X7Z*MTcwNTc2MjY5Ni4xLjEuMTcwNTc2Mjc4MS4wLjAuMA
- [4] USGBC (2020) LEED v4.1 Building Design and Construction Rating System - July 2020, United States Green Building Council, Washington. [Online] <https://www.usgbc.org/resources/leed-v41-building-design-and-construction-rating-system-july-2020> [enero 3, 2025].
- [5] BRE (2021) BREEAM International New Construction 6, Building Research Establishment, Watford. (Pagina 255) [Online] <https://breeam.com/standards/technical-manuals-form> [enero 3, 2025].
- [6] DOE (2017) A Common Definition for Zero Energy Buildings, US Department of Energy. Washington D.C. [Online] <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/A%20Common%20Definition%20for%20Zero%20Energy%20Buildings.pdf> [enero 3, 2025].
- [7] Chastas, P., Theodosiou, T., & Bikas, D. (2016). Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review. *Building and Environment*, 105, 267-282. [Online] <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.040> [enero 3 2025].
- [8] Mannan, M, Al-Ghamdi S. G. (2020) Environmental impact of water-use in buildings: Latest developments from a life-cycle assessment perspective, *Journal of Environmental Management*, Volume 261, 1 May 2020, 110198.
- [9] ISO (2014) ISO Standard 14046:2014, Environmental Management-Water Footprint-Principles, Requirements and Guidelines; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.
- [10] Hoekstra, A.Y., Chamagain, A., Aldana, M.M., y Mekonnen, M.M. (2021) Manual de evaluación de la Huella hídrica, AENOR Internacional, S.A.U. Madrid.
- [11] Herrero, A.C. (S.F.) Huella Hídrica, [Online] https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/7_huella_hidrica.docx [enero 3, 2025].
- [12] AySA (2022). Informe de Sustentabilidad 2022, Tomo 1.1, Aguas y Saneamiento Argentina, CABA. [Online] https://www.aysa.com.ar/media-library/usuarios/informacion_util/informes_de_sustentabilidad/AySA_RS2022_VF.pdf [enero 3, 2025].
- [13] AySA (2024) Reporte de Sustentabilidad 2023, Aguas y Saneamiento Argentina, CABA. [Online] https://www.aysa.com.ar/media-library/usuarios/informacion_util/informes_de_sustentabilidad/RSE_AySA_2023.pdf [enero 3, 2025].
- [14] CAMMESA (2024) Informe Anual 2023, Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima, CABA, [Online] <https://microfe.cammesa.com/static-content/CammesaWeb/download-manager-files/Informe%20Anual/2024/Informe%20Anual%202023.pdf> [enero 3, 2025].
- [15] INDEC (2024) Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022: Región Metropolitana Buenos Aires. Instituto Nacional de Estadística y Censo, CABA, [Online] https://www.indec.gov.ar/ftp/cuadros/poblacion/censo2022_rmba.pdf [enero 3, 2025].
- [16] Ministerio de Economía (2022) Balance Energético Nacional 2022, [Online] https://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion_del_mercado/publicaciones/energia_en_gra/balances_2022/balance_2022_V0_horizontal.xlsx [enero 3, 2025].
- [17] SE (2024) Cálculo del Factor de Emisión de CO2 de la Red Argentina de Energía Eléctrica, Secretaria de Energía de la Nación, CABA. [Online] <https://datos.minem.gov.ar/dataset/calculo-del-factor-de-emision-de-co2-de-la-red-argentina-de-energia-electrica> [enero 3, 2025].
- [18] Parravicini, VV., Svoldal, K. & Krampe, G. (2016) Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants, *Energy Procedia*, Volume 97, 2016, Pages 246-253.
- [19] MAYDS. 2023. Quinto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones, [Online] <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/5to%20Informe%20Bienal%20de%20Actualizaci%C3%B3n%20de%20la%20Rep%C3%BAblica%20Argentina.pdf> [enero 3, 2025].
- [20] CAMMESA (2023) Resumen Ejecutivo, Principales Variables MEM, Enero a Diciembre 2022 vs 2021, Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima, CABA. [Online] <https://microfe.cammesa.com/static-content/CammesaWeb/download-manager-files/NovedadesHome/Resumen%20Ejecutivo%20Ene%20a%20Dic%202022%20vs%202021.pdf> [enero 3, 2025].
- [21] Antonelli, M., Sartori, M. (2015) Unfolding the Potential of the Virtual Water Concept. What Is Still Under Debate?

- Environmental Science & Policy, Volume 50, June 2015, Pages 240-251
- [22] Vanham, D., Medarac, H. Schyns, J., Hogeboom, R. y Magagna, D. (2019) The consumptive water footprint of the European Union energy sector, Environmental Research Letters, Volume 14, Number 10
- [23] UN-OHCHR (2010) (UN-HABITAT), The Right to Water, Fact Sheet No. 35. 2010, World Health Organization & Office of the High Commissioner for Human Rights (OHCHR), United Nations Human Settlements Programme. [Online] <http://www.ohchr.org/Documents/Publications/FactSheet35en.pdf> [enero 3, 2025].
- [24] Malton P.J. (2015) The Embodied Energy of Tap Water, Build Green, Volume 24, Issue 8. [Online] <https://www.buildinggreen.com/primer/embodied-energy-tap-water> [enero 3, 2025].
- [25] ASE (2002) Watergy: taking advantage of Untapped Energy and water efficiency opportunities in Municipal Water systems, Alliance to Save Energy, Washington DC. [Online] https://www.ase.org/sites/ase.org/files/watergy_2002.pdf [enero 3, 2025].
- [26] Rajhans Negi, Munish K. Chandel (2022) Assessment on embodied energy and greenhouse gas emissions in urban water system from life cycle perspective: A typical case of India, Sustainable Cities and Society, Volume 86, 2022, 104152, [Online] <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104152>
- [27] Hammond, G. y Jones, C. (2011) Inventory of Carbon & Energy (ICE), Version 2.0, Sustainable Energy Research Team (SERT), Department of Mechanical Engineering, University of Bath. [Online] <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html> [enero 3, 2025].
- [28] SMN (2024) Estadísticas Climatológicas Normales - período 1991-2020, Servicio Meteorológico Nacional, CABA. https://ssl.smn.gob.ar/dpd/observaciones/estadisticas_normales_9120.zip [enero 3, 2025]. Fecha de recepción: 11 de diciembre de 2024 / Aceptación: 15 de enero de 2025.