

- ▲ **Palabras clave/** Análisis de ciclo de vida, edificio público ambiental, arquitectura sustentable, huella de carbono.
- ▲ **Keywords/** Life Cycle Analysis, environmental public building, sustainable architecture, carbon footprint.
- ▲ **Recepción/** 14 de septiembre 2023
- ▲ **Aceptación/** 16 de febrero 2024

Análisis del ciclo de vida de un edificio público ambiental

Life Cycle Analysis of an Environmental Public Building

Analia Alvarez

Arquitecta, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.
Doctora en Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.
Investigadora asistente, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.
analiaalvarez015@gmail.com

Alejandra Kurbán

Arquitecta, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.
Doctora en Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.
Profesora titular, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.
Profesional principal, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.
akurban@unsj.edu.ar

RESUMEN/ Se aborda el análisis del ciclo de vida para cuantificar las emisiones de dióxido de carbono (CO²) de un edificio público sustentable en zona árida. Se toma como caso de estudio el Centro Ambiental Anchipurac (CAA) San Juan, Argentina, aplicando las normas IRAM-ISO 14040:2008 e IRAM 21931-1/12. Se considera un enfoque de la "fábrica a la tumba", una vida útil de 50 años y kilos por metro cuadrado (kg/m²) como unidad funcional; el análisis excluye las etapas de extracción y procesamiento de la materia prima. La cantidad de emisiones de CO², resulta de la sumatoria de la energía operativa, la energía incorporada y el transporte al vertedero. Se obtiene que corresponden al CAA 14.991.294,48 kg CO² eq, es decir menos del 2 % del total de emisiones de un conjunto habitacional estándar. No obstante, su consumo energético por metro cuadrado es 357 % superior a aquél de edificios públicos de mayor superficie cubierta. **ABSTRACT/** The Life Cycle Analysis is addressed to quantify the carbon dioxide (CO²) emissions of a sustainable public building in an arid area. The case study used is the Anchipurac Environmental Center (CAA), located in San Juan, Argentina. The IRAM-ISO 14040:2008 and IRAM 21931-1/12 standards are applied, considering a "cradle to grave" approach, a service life of 50 years, and kilograms per square meter (kg/m²) as functional unit. The analysis does not include the raw material extraction and processing stages. The amount of CO² emissions results from adding operative energy, introduced energy, and transportation to the landfill. As a result, 14,991,294,48 kg CO² eq correspond to the CAA, i.e., less than 2 % of the total emissions of a standard housing complex. However, the energy consumption per square meter is 357 % higher than those of public buildings with a larger surface area cover.

INTRODUCCIÓN

La transformación del ambiente natural en artificial es el resultado de un proceso de desarrollo que exige la ocupación y extracción continua y creciente de materias primas y energía. Es decir que los bienes y servicios asociados a un mejor nivel de vida implican el deterioro y el agotamiento del patrimonio ambiental y de sus recursos naturales, con efectos sociales regresivos (CEPAL, 2019). A nivel mundial, el 38 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con

la energía corresponden al sector edilicio. De mantenerse esta tendencia, el sector se aleja de su potencial para contribuir a mitigar el cambio climático y alcanzar los objetivos de la Agenda 2030. Por lo tanto, resulta necesario establecer estrategias que permitan reducir la demanda de energía, la descarbonización del sector eléctrico, la implementación del uso de materiales de base biológica y la economía circular. Conforme a este enfoque, la recuperación de la industria de la construcción, particularmente

luego del impacto del COVID-19, constituye una oportunidad para incluir códigos de construcción y estándares de certificación sostenibles que permitan fortalecer las acciones hacia un parque edilicio con cero emisiones de carbono (Naciones Unidas, 2020).

En esta dirección, el análisis de ciclo de vida (ACV) constituye un método para comprender y tratar los posibles impactos asociados a productos, procesos y servicios a partir de la recopilación y evaluación de

las entradas y salidas de dichos sistemas (IRAM-ISO 14040:2008). Su realización en etapas iniciales de diseño permite establecer un panorama completo de los impactos ambientales vinculados a la construcción (Röck *et al.*, 2018). Al respecto, Mercader Moyano *et al.* (2019) exponen que el mayor impacto de urbanizaciones y edificaciones se produce durante la construcción. En este sentido, las autoras destacan que las emisiones de CO₂ pueden reducirse hasta en 30 % como resultado de seleccionar materiales de bajo impacto.

En relación con el estado del arte, puede mencionarse el trabajo de Herrando *et al.* (2022) orientado al análisis de ciclo de vida de sistemas de energía solar para climatización y electricidad. En Rabani *et al.* (2021), se abordan las emisiones de CO₂ asociadas a la rehabilitación de un edificio de oficinas noruego. Por su parte, Dong *et al.* (2021), realizan un estudio comparativo de los resultados del análisis de ciclo de vida de diferentes edificios conforme a una revisión sistemática, a partir de la cual proporcionan estadísticas para siete categorías de impacto y tres categorías de daños, mientras que Cai *et al.* (2022) analizan el impacto de los gases de efecto invernadero sobre un edificio con certificación LEED. En esa línea, Li *et al.* (2023) definen las trayectorias energéticas futuras del ciclo de vida en edificios residenciales hasta 2050, a partir de la aplicación de diferentes estrategias de ahorro de energía, al tiempo que Macías *et al.* (2017) analizan la energía incorporada y operativa de diferentes métodos constructivos empleados en viviendas de interés social en Ecuador. Las herramientas orientadas a la toma de decisiones con base en distintas opciones de diseño son abordadas por Zhou *et al.* (2023) y Mukkavaara y Shadram (2021). Por su parte, Minunno *et al.* (2021) establecen el punto de referencia de los impactos ambientales asociados a los edificios y desarrollan una

guía de procedimientos orientados a disminuir dichos impactos. El análisis de sistemas de cubiertas planas se encuentra en el trabajo de Botejara-Antúnez *et al.* (2022), mientras que Kavitha y Molykutty (2021) exponen el análisis energético del ciclo de vida de un edificio comercial acristalado a partir de herramientas de modelado de información de construcción. En todos los casos, se destaca la necesidad de cuantificar las emisiones de CO₂ de los edificios a los efectos de construir una base sólida para la realización del análisis del ciclo de vida en el sector de la construcción y, por ende, propender a un enfoque integral de la sostenibilidad edilicia que favorezca la toma de decisiones de diseño orientadas a la descarbonización.

Fundándose en lo anterior, esta investigación surge en respuesta a los Objetivos de

Desarrollo Sostenible (ODS) números 7, 9, 11, 12 y 13¹. En consecuencia, expone un esquema metodológico orientado a la determinación del impacto en el cambio climático asociado al ciclo de vida de un edificio público sustentable. Para ello, se toma como caso de estudio el edificio Centro Ambiental Anchipurac (CAA), perteneciente a la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del gobierno de la provincia de San Juan, Argentina. Al respecto, se destaca que los resultados alcanzados permiten establecer una línea base respecto de los impactos vinculados a dicha tipología edilicia; además y desde una visión centrada en el diagnóstico y el monitoreo, favorecen –a futuro– el diseño y puesta en marcha de acciones orientadas a la reducción de las emisiones de CO₂ en fase de uso.

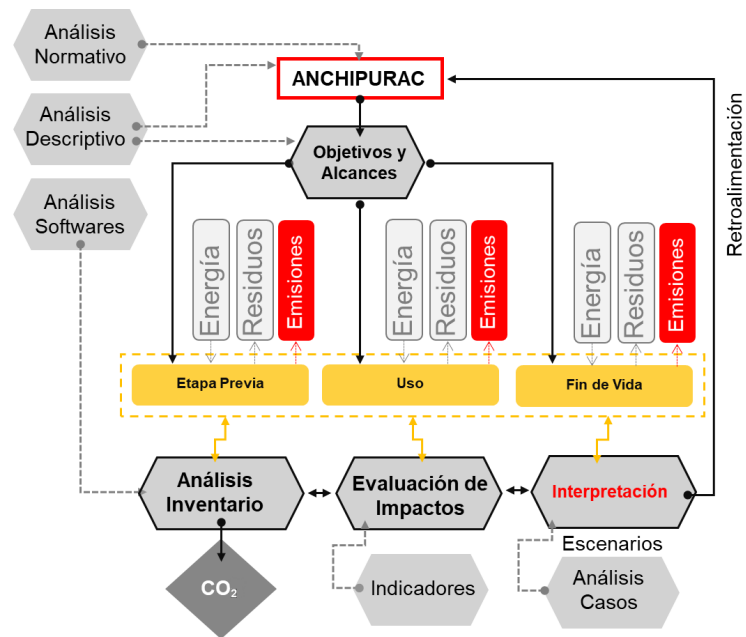


Figura 1. Esquema metodológico aplicado al ACV del CAA (fuente: elaboración propia, 2023).

1 <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

METODOLOGÍA DE ESTUDIO DEL ACV

La estructura metodológica utilizada corresponde con la aplicación de las normas IRAM-ISO 14040:2008 e IRAM 21931-1/12 al análisis de un edificio público sustentable en zona árida, a partir de tomar como caso de estudio el Centro Ambiental Anchipurac (CAA), ubicado en San Juan, Argentina. De acuerdo con dicho marco normativo, un estudio de ACV considera las siguientes cuatro fases:

- **Fase 1: definición de objetivos y alcances del análisis.** Los alcances del sistema objeto de estudio se precisan considerando los siguientes aspectos: objetivos que motivan el estudio; función del sistema; unidad funcional; y límites del sistema.
- **Fase 2: análisis de inventario.** Se cuantifican y recopilan los datos de los flujos energéticos y materiales entrantes y salientes del sistema durante su vida útil.
- **Fase 3: evaluación de impactos.** Se realiza una clasificación y evaluación de los resultados orientada a determinar los efectos ambientales observables por medio de un conjunto de categorías de impactos.
- **Fase 4: interpretación de los resultados.** Los resultados son evaluados para establecer las conclusiones y recomendaciones finales. Para ello se utilizan técnicas como el análisis de sensibilidad sobre los datos utilizados, análisis de la relevancia de las etapas del proceso, análisis de escenarios alternativos, etc.

La figura 1 sintetiza el esquema metodológico adoptado.

Caso de estudio: descripción edilicia

El Centro Ambiental Anchipurac (CAA) forma parte del Complejo Ambiental San Juan (figura 2); con base en la economía circular, promueve la aplicación de nuevas tecnologías para la gestión ambiental y disposición de residuos, la investigación, la educación y la producción industrial. Construido entre 2014 y 2016, tiene una superficie cubierta total de 3.035,85 m² y, siguiendo pautas bioclimáticas, se orienta longitudinalmente en el eje este-oeste a lo largo de 180m

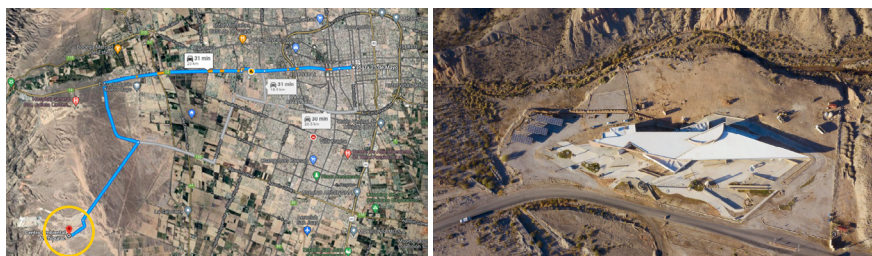


Figura 2. Localización del CAA e imagen superior del edificio y su entorno (fuente: elaboración propia en base a Google Maps y CAA, 2023).

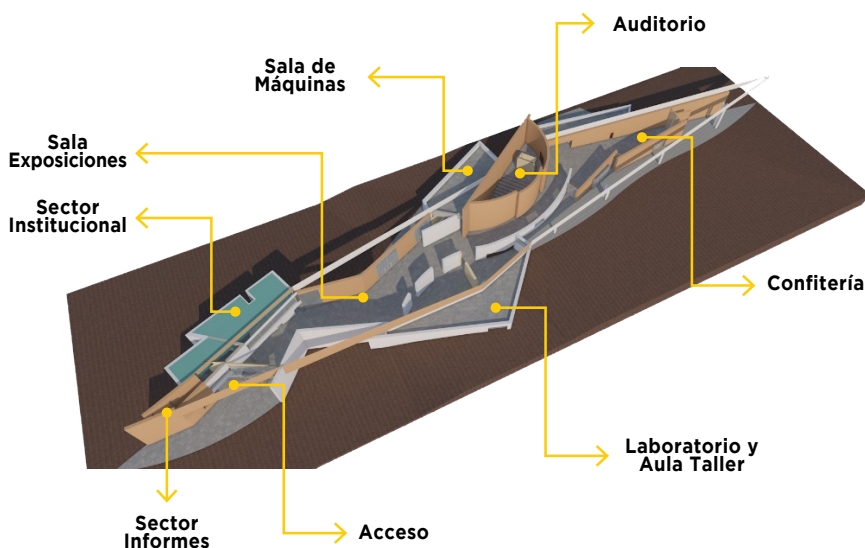


Figura 3. Áreas funcionales del edificio del CAA (fuente: elaboración propia en base a documentación técnica provista por el CAA, 2023).

lineales de recorridos didácticos, educativos y culturales (figura 3).

Su distribución lineal, con amplias superficies vidriadas al norte y al sur, facilita el acondicionamiento térmico pasivo aprovechando la radiación solar en invierno y evitándola en verano. Dicha distribución favorece la ventilación cruzada y permite lograr mayor luminosidad y ahorro energético. Además, cuenta con aislación en pisos, techos y muros como estrategia bioclimática de conservación de la energía, y presenta aleros y galerías que -junto con la forestación-

permiten asoleamiento selectivo. Para que el edificio se beneficie de la temperatura de la tierra y para aprovechar la pendiente natural del terreno, el 40 % de su superficie se encuentra por debajo de 2m de profundidad. Asimismo, utiliza energías limpias y renovables, como la solar fotovoltaica y la geotérmica por agua, las cuales complementan las instalaciones convencionales y cuenta con materiales nobles que requieren bajos costos de mantenimiento y poseen durabilidad en el tiempo: hormigón, ladrillos macizos, metal y madera. Por último, recolecta el agua lluvia

en canaletas exteriores para destinarla a regar el entorno y cuenta con biodigestores en los baños para reutilizar las aguas grises.

Fase 1. Definición de objetivos y alcances del análisis

Debido a que el objetivo de este estudio es determinar el impacto ambiental de un edificio público sustentable en zona árida en relación con el cambio climático, se definen los siguientes aspectos (figura 4):

- Límite espacial: el Centro Ambiental ANCHIPURAC se ubica a 20km del centro de la ciudad en una zona no urbana, sobre calle Agustín Gómez y pie de monte de la Sierra Chica - La Bebida - Rivadavia, San Juan, Argentina.
- Límite temporal: en respuesta a lo establecido por la norma IRAM 21931-1/12, en esta investigación el análisis del ciclo de vida incluye las etapas de uso y fin de vida, así como una aproximación a la etapa previa a la entrega o de construcción. Por lo tanto, corresponde a un enfoque llamado "de la fábrica a la tumba".
- La unidad funcional adoptada son los kilos por metro cuadrado (kg/m²). La vida útil considerada es de 50 años y se orienta a aquellos actores que intervienen en el proceso de construcción sustentable. Adicionalmente, se destaca que este análisis se centra en los elementos que integran el CAA cuyas características constructivas se detallan en la figura 5.
- Fuentes de información: Normas IRAM, simulaciones, consumos registrados.
- Limitaciones: por falta de trazabilidad en la información, quedan fuera del análisis las etapas de extracción y procesamiento de la materia prima. Para el cálculo de la energía incorporada (EI) se considera que el transporte es realizado por un camión de eje simple, 4x2, cuya carga útil es de 7 toneladas y consumo estimado, de 6 km/l de gasoil; a partir de las características de la trama urbana del Área Metropolitana de San Juan (AMSJ), se estima que la distancia promedio desde el punto de venta a la obra es de 20 km. Los consumos de energía vinculados con los materiales

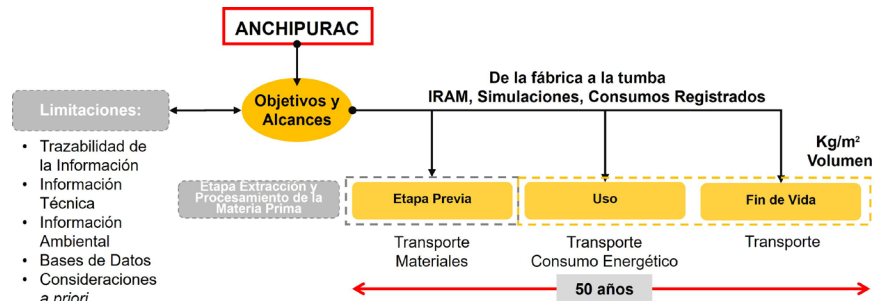
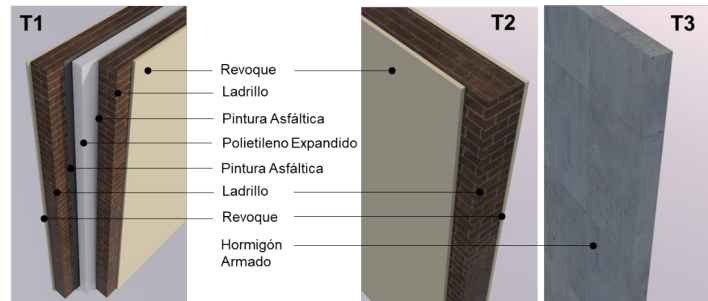


Figura 4. Síntesis de objetivos y alcances del análisis (fuente: elaboración propia, 2023).



- Pisos y Losas: Hormigón Armado espesor=15cm – Veredines espesor=5cm
- Cubierta: Chapa+Lana de Vidrio+Placa de Yeso espesor=98cm
- Tabiques T4 Tipo Durlock espesor= 10cm

Figura 5. Elementos constructivos considerados en el análisis (fuente: elaboración propia con base en documentación técnica provista por el CAA, 2023).

se obtienen de fuentes primarias de información. Para la energía operativa (EO), se consideran los consumos registrados por la distribuidora de energía de la provincia de San Juan. Adicionalmente, el transporte de trabajadores y público en general se obtiene de estadísticas del CAA. La etapa de fin de vida se mide a partir de las emisiones asociadas al transporte de los residuos de la construcción y demolición, desde la obra hasta el vertedero.

Fase 2. Análisis del Inventario

Las emisiones de dióxido de carbono se calculan según las fórmulas expuestas en Álvarez y Ripoll (2018). De acuerdo con

dichas autoras, el cálculo corresponde a la siguiente expresión:

$$\text{Emisiones CO}_2 = EI_T + EO + TDF \text{ [kg CO}_2\text{eq]}$$

Donde:

EI_T: energía incorporada total

EO: energía operativa

TDF: transporte disposición final

Recopilación de entradas fase previa: energía incorporada

La energía incorporada es la energía utilizada durante la etapa previa a la entrega del edificio, es decir, aquella que corresponde a su etapa de construcción. Dado que el enfoque utilizado en esta investigación se relaciona

con una aproximación a dicha etapa, su cálculo involucra las emisiones asociadas al transporte y la fabricación de los materiales que integran los diferentes componentes arquitectónicos del CAA por cada metro cuadrado de construcción de los mismos. La expresión utilizada para la cuantificación de las emisiones de esta etapa es:

$$EI_T = (EI_{TPM} * FE) + (EI_{TTM} * FE) \text{ [kg CO}_2\text{eq]}$$

Donde:

FE: factor de emisión

FC: factor de conversión

El_T: energía incorporada total

El_{TPM}: Energía incorporada total para la producción de materiales. Se obtiene a partir de la sumatoria del producto de la masa del material por metro cuadrado y la energía utilizada en su fabricación (EIF). Su cálculo responde a la siguiente ecuación:

$$EI_{TPM} = \sum (\text{Masa Material}_i * EIF_i) \text{ [kWh]}$$

Masa material = volumen [m³] * densidad δ [kg/m³] = [kg]

El_{TTM}: Energía incorporada total para el transporte de materiales. Su valor se obtiene de las siguientes expresiones:

$$EI_{TTM} = Com_{nec} * FC \text{ [kWh]}$$

$$Com_{nec} = C_{cc} * Cv \text{ [l]}$$

$$C_{cc} = Dc / Ac \text{ [l]}$$

$$Cv = Cap_{CT} / Sup_{MT}$$

$$Cap_{CT} = C_{cac} / (\text{masa} * Sup_{MT}) \text{ [m}^2\text{]}$$

Com_{nec}: combustible necesario para el transporte de materiales al punto de venta/obra

C_{cc}: consumo combustible camión

Dc: distancia de la obra al centro de la ciudad en km

Ac: autonomía camión (6 km/l)

Cv: cantidad de viajes necesarios para transportar el material a la obra

Cap_{CT}: capacidad de carga del camión en m² a transportar

C_{cac}: capacidad de carga admisible del camión (7.000 kg)

Sup_{MT}: superficie del material a transportar
Adicionalmente, se destaca que las densidades de los materiales considerados en el análisis se extraen de la norma IRAM 11601 y el volumen, del cómputo de materiales resultante del uso

Mes/Año	Total de Personas (Mensual)	Origen San Juan	Origen Otros	Cantidad de Personas Diaria Promedio	Consumo Energético Promedio	Rango Etario Predominante
sep-21	1.146	1.010	136	38	11.235	10 - 19
oct-21	2.736	2.592	144	88	24.780	10 - 19
nov-21	4.326	4.225	101	144	34.255	10 - 19
dic-21	1.340	1.230	110	43	52.815	10 - 19
ene-22	617	269	348	20	79.335	20 - 39
feb-22	1.250	863	387	45	81.555	20 - 39
mar-22	639	520	119	21	67.290	20 - 39
abr-22	1.184	913	271	39	29.040	10 - 19
may-22	2.083	1.881	202	67	26.130	10 - 19
jun-22	2.011	1.858	153	67	45.405	10 - 19
jul-22	3.638	2.930	708	117	53.010	10 - 19
ago-22	2.922	2.822	100	94	58.485	10 - 19
Valores Promedio	1.991	1.759	232	65	46.945	

Tabla 1. Valores promedio de visitantes y consumo eléctrico (fuente: elaboración propia con base en información provista por el CAA, 2023).

de herramientas BIM (*Building Information Modelling*).

Por otro lado, dado que no se cuenta con datos locales, la energía incorporada de los materiales utilizados en el CAA se obtiene de Quispe Gamboa (2016). Asimismo, el factor de emisión considerado es 0,276kgCO₂eq/kWh (MAyDS, 2023) y los factores de conversión corresponden a: 11,70kWh por cada metro cúbico de gas natural y 10,96kWh por litro de gasoil.

Recopilación de entradas fase de uso: energía operativa

El cálculo de la energía operativa (EO) considera conjuntamente la energía necesaria para climatización e iluminación y las emisiones asociadas al transporte de los visitantes y trabajadores del CAA durante la vida útil del edificio. Para ello, se toman como punto de partida los consumos registrados en las

boletas de la distribuidora de energía de la provincia de San Juan correspondientes al período 09/2021 - 08/2022. A esto se le suman las emisiones relacionadas con el transporte de los visitantes diarios, cuyos valores se estiman a partir de las estadísticas realizadas en el CAA. La tabla 1 expone el consumo energético y la cantidad de visitantes registrados en el período de análisis.

Conforme a lo antedicho, la EO se obtiene de:

$$EO = (CEr * FE) + T \text{ [kg CO}_2\text{eq]}$$

Donde:

CEr: consumo de energía registrado

T: emisiones asociadas al traslado de visitantes y trabajadores al CAA. Su valor se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$T = [(Cca * Cvd) * VU] * FC * FE \text{ [kg CO}_2\text{eq]}$$

$$Cca = Dc / Aa \text{ [l]}$$

$$Cvd = DL * Vdp$$

Donde:

FE: factor de emisión

FC: factor de conversión

Cca: consumo combustible automóvil familiar

Aa: autonomía automóvil familiar (0,734km/l)

Dc: distancia del CAA al centro de la ciudad en km

DL: días laborales anuales (aproximadamente 365)

Vdp: viajes diarios promedio (aproximadamente 70)

Cvd: cantidad de viajes anuales

VU: vida útil del edificio (50 años)

Recopilación de entradas fin de vida: transporte disposición final

El cálculo de las emisiones asociadas a la etapa de fin de vida se obtiene a partir de considerar el transporte de los residuos resultantes de la demolición del edificio a su disposición final en el vertedero. Al respecto, se destaca que el CAA se encuentra a 1,4km del Parque Industrial Tecnológico Ambiental Regional (PITAR), el cual se dedica a la recolección, la clasificación y el procesamiento de residuos, que incluyen desechos de construcción y demolición en el sector de la escombrera. Por otro lado, de acuerdo al cómputo realizado, el volumen total a considerar es de 7681,65m³.

A los efectos del cálculo, se utiliza la siguiente expresión:

$$TDF = (C_{cc} * FC * FE) * C_{VFD} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}$$

Donde:

FE: factor de emisión

FC: factor de conversión

Ac: autonomía camión (6 km/l)

D: distancia para transportar el material a la obra/vertedero

C_{cc}: consumo combustible camión. Su valor resulta de la siguiente expresión:

$$C_{cc} = D / Ac \text{ [l]}$$

C_{VFD}: cantidad de viajes necesarios para transportar el material al vertedero. Su valor se obtiene de la relación entre el volumen de los materiales a trasladar y el volumen del contenedor.

Recopilación de salidas: matriz MOM - open LCA

Con la información precedente, se completa una matriz de optimización multiobjetivo (MOM), (Álvarez y Ripoll, 2018), que presenta los resultados alcanzados en el análisis conforme a las características de los elementos constructivos utilizados en la materialización del CAA.

Asimismo, se aplica el software de código abierto OpenLCA (versión 1.11.0), que permite llevar a cabo ACV de distintos procesos. Al respecto, se destaca que las variables de entrada consideradas corresponden a las masas de cada uno de los materiales utilizados en la producción de un metro cuadrado de muro (T1, T2, T3 y T4), de losas y contrapisos (hormigones) y de cubierta. La metodología de cálculo seleccionada es IPCC 2021 AR6, indicador IPCC 2021 GWP 100, y, las bases de datos utilizadas fueron bioenergiedat_18; usda_1901009; elcd_3_2_greendelta_v2_18; needs_18; ozlci2019; y worldsteel_2020.

Fase 3: evaluación de impactos

Se utiliza la metodología descrita en IMPACT2002+, que para los datos recogidos en el inventario -es decir para los recursos naturales consumidos y las emisiones generadas a lo largo del ciclo de vida- determina su contribución a cada una de las 14 categorías de impacto de punto medio, que a su vez se agrupan en cuatro categorías de daño.

El análisis se subdivide en:

- Puntaje del impacto: se selecciona la categoría calentamiento global o cambio climático. El indicador que sirve para evaluar este impacto es el CII *Climate Change Impact* o impacto del cambio climático), que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CCI = \sum GWP_i \times m_i \text{ [kg CO}_2\text{eq]}$$

Donde:

CCI: indicador de cambio climático

GWP_i: potencial de calentamiento global= 1 a partir de considerar un horizonte temporal de 100 años

m_i: masa de la sustancia *i*.

- Caracterización del daño: los potenciales de caracterización del punto medio se multiplican por los factores de caracterización del daño de las sustancias de referencia. Por lo tanto, su cálculo responde a la siguiente expresión:

$$C_d = CCI \times F_d \text{ [kg CO}_2\text{eq]}$$

Donde:

C_d: puntaje de caracterización del daño

CCI: indicador de cambio climático

F_d: factor de daño; se obtienen de Jolliet *et al.*, 2003

- Normalización del daño: relación del impacto por unidad de emisión dividido en el impacto total de todas las sustancias de la categoría específica para las que existen factores de caracterización, por persona y año. Este cálculo responde a la siguiente expresión:

$$N_d = C_d / F_n \text{ [kg CO}_2\text{eq]}$$

Donde:

N_d: puntaje de normalización del daño

C_d: puntaje de caracterización del daño

F_n: factor de normalización del daño; se obtienen de Jolliet *et al.*, 2003.

Ponderación del daño: se omite su realización en este análisis ya que, al momento de la realización de esta investigación, no hay una metodología estandarizada para su ejecución.

Fase 4: interpretación de los resultados

Se realiza un estudio comparativo conforme a cuatro escenarios: muy favorable, favorable, base, desfavorable y muy desfavorable. Para ello, se plantean cuatro edificios de referencia a partir del edificio objeto, con su misma forma, tamaño, orientación, zonificación interior, uso del espacio, obstáculos remotos y soluciones constructivas.

Para determinar las características de los edificios de referencia, se analizan el consumo y la superficie de cuatro edificios de oficinas (Secretaría de Energía, 2010) en relación con los valores del CAA. Además, de acuerdo con lo expuesto en el apartado

	Muy Desfavorable	Desfavorable	Referencia (Base)	Favorable	Muy Favorable
Porcentaje de Variación (%)	+60	+10	0	-50	-70
Consumos Energéticos (kWh/año)	901.336	619.668,5	563.335	281.667,5	169.000,5
Acciones Asociadas	Dejan de utilizarse energías renovables	No se realizan tareas de mantenimiento preventivo	—	Se incrementa la potencia asociada a las energías renovables	Se implementan más acciones de eficiencia energética

Tabla 2. Escenarios posibles (fuente: elaboración propia, 2023).

Caracterización del Edificio					CCI	Energía Incorporada - ETAPA PREVIA			Energía Operativa - ETAPA POSTERIOR		FIN DE VIDA
Componente Arquitectónico	Tipo	Espesor	Superficie	Masa (kg)		El _{TPM} (kWh)	El _{TTM} (kWh)	El _T (kg CO ₂ eq)	Consumo Eléctrico (kg CO ₂ eq)	Transporte (kg CO ₂ eq)	Transporte a Disposición Final (kg CO ₂ eq)
Pared	Ladrillón Macizo - T1	0,6	7.312	7.610.469,80	7.610.469,80	4.566.281,878	39.719,40	1.271.256,4	7.774.092,00	5.672.919,235	1.084.392702
	Ladrillón Macizo - T2	0,2	534	185.386,73	185.386,735	111.232,0408	967,54	30.967,10			
	Tabique Tipo Durlock - T4	0,015	18	275,82	275,816327	137,9081633	1,44	38,5			
	Muro de hormigón - T3	0,15	46	17.605,87	17.605,8673	1.760,586735	88,87	510,4			
Cubierta	Losa Maciza (H°A°)	0,12	377	115.484,69	259.840,561	25.984,05612	1.356,12	7.545,9			
		0,15	449	144.355,87							
	Metálica	0,002	4.921	78.838,83	78.838,8316	764.736,6668	411,46	211.180,9			
Pisos	Contrapiso Alisado	0,15	2.280	872.544,64	872.544,643	87.254,46429	4.553,85	25.339,1			
		0,05	1.065	135.844,39	135.844,388	13.584,43878	708,98	3.945,0			
					9.160.806,64			1.543.198,9	7.774.092	5.672.919,235	1.084,392702

Perímetro	0
Superficie Total	3.035,85
Volumen	7.681,75
Vida Útil	50
Días Laborables	365
Viajes Promedio al centro	70
Viajes Camión	1.536,35

Distancia al centro de la ciudad	20	Consumo vehículo anual (l)	37.507,4
Distancia al vertedero	14	Consumo del Camión	358,4816667

Emisiones Totales (kg CO₂ eq)	14.991.294,48
---	----------------------

Tabla 3. Matriz de optimización multiobjetivo del CAA (fuente: elaboración propia con base en Álvarez y Ripoll, 2018).

Elemento	Superficie (m ²)	Masa (kg)	Total	Ladrillo	Mortero	Pintura Asfáltica	Hormigón	Chapa	Lana de Vidrio	Placa de Yeso	Emissiones por Kg (Kg CO ₂ eq)	Emissiones Totales (Kg CO ₂ eq)
T1	3.656,01	916	3.349.819,20	6.712.347,70	6.525.842,80	805.085,40					4,19	14.043.275,9
T2	534	447	238.698,00	239.150,80	232.505,90						1,98	471.656,7
T3	46	270	12.420,00				11.146,20				0,9	11.146,2
T4	18	18	324							17	0,05	17
Cubierta	4.921	34	166.526,60						42.171,10	3.205,60	0,27	45.376,7
Losas 012	377	216	81.432,00				58.464,50				0,72	58.464,50
Losas 0,15	449	270	121.230,00				108.797,10				0,9	108.797,1
Contrapisos	2.280	270	615.600,00				552.466,30				0,9	552.466,3
Pisos Ext.	1.065	90	95.850,00				28.673,30				0,3	28.673,3
TOTAL Etapa Previa												15.319.873,74
Comparación CCI MOM							7.714.268,54					

Tabla 4. Síntesis de los resultados obtenidos en OpenLCA (fuente: elaboración propia, 2023).

■ Leyenda: Elementos considerados en la MOM y en OpenLCA.

“Caso de estudio: descripción edilicia”, el CAA cuenta con energía renovable que supone una capacidad de mejora de su consumo energético del orden del 40 % para el caso de energía fotovoltaica y geotermia, del 70 % en refrigeración y del 50 % en calefacción. A partir de dicho análisis se elabora la Tabla 2 que sintetiza las características de los distintos escenarios adoptados.

RESULTADOS

De la fase análisis del inventario se obtienen los resultados expuestos en las tabla 3 y 4, correspondientes a la aplicación de la MOM y de OpenLCA, respectivamente. La tabla 5 muestra los resultados obtenidos en la fase evaluación de impactos. La fase de interpretación de los resultados se muestra en la tabla 6.

Según se muestra en la tabla 3, el mayor porcentaje de emisiones de CO₂ corresponde a la sección consumo eléctrico de la etapa de uso. Por lo tanto, las estrategias de reducción de emisiones deberían enfocarse –en el corto plazo– en disminuir las emisiones asociadas con el consumo energético del edificio. En una segunda instancia, debería considerarse el transporte desde la ciudad al CAA.

Evaluación del Impacto	Resultados por Etapa (kg CO ₂ eq)			GWP/F _D /F _N	Total	
	Previa	De Uso	Fin de Vida			
CCI				1	14.991.294,48	kg CO ₂ eq
C _D	1.543.198,85	13.447.011,24	998,615209	1	14.991.294,48	kg CO ₂ eq
N _D				9,950	1.506,65	Persona año

Tabla 5. Síntesis de los resultados obtenidos en la evaluación de impactos (fuente: elaboración propia, 2023).

	Muy Desfavorable	Desfavorable	Referencia (Base)	Favorable	Muy Favorable
Porcentaje de Variación (%)	60	10	0	-50	-70
Consumos Energéticos (kWh/año)	901.336	619.668,5	563.335	281.667,5	169.000,5
Emisiones Totales para todo su ciclo de vida (kgCO ₂ eq)	19.655.639,30	15.768.627,80	14.991.225,50	11.104.213,98	9.549.409,38
Puntaje de Caracterización del Daño Normalizado (Persona año)	40	39	36	26	22

Tabla 6. Síntesis de los resultados obtenidos en la interpretación de los resultados por escenario (fuente: elaboración propia, 2023).

Por su parte, el muro T1 es el que mayores impactos generó durante la etapa previa (tabla 4), situación que surge de considerar el aporte del cemento y de los ladrillos. No obstante, los resultados no corresponden a base de datos nacionales; por lo tanto, deben ser considerados desde la variabilidad que implica esa perspectiva. Adicionalmente, se destaca que los materiales utilizados en el CAA generaron -en total- 15.319.873,74

kgCO₂eq. Si comparamos este resultado con el obtenido en la MOM, se observa que la consideración de dichos materiales arroja resultados de igual orden. Al respecto, en OpenLCA se obtienen 7.714.268,54 kg CO₂ eq y en la MOM= 9.160.806,64 kg CO₂ eq. En este sentido, se requiere la revisión de los resultados obtenidos en función de la trazabilidad de las bases de datos utilizadas en la matriz de cálculo del software, las cuales

Variables de Análisis	Unidades de Demostración				Centro Ambiental Anchipurac
	Oficinas Capital Federal	Oficinas Jujuy	Oficinas Tucumán	Oficinas Neuquén	
Superficie Cubierta (m ²)	2.514	5.530	1.368	5.400	3.035,85
Consumo Eléctrico (kWh/año)	426.600	290.000	124.221	613.893	563.335
kWh/m²	170	52	91	114	185,56
Emisiones en Fase de Uso (Kg CO ₂ eq)	164.241	111.650	47.825	236.349	7.774.092,00
Potenciales de Ahorro en Energía Eléctrica (kWh)	71.057	78.300	36.638	124.491	225.334
Potenciales de Ahorro en Energía Eléctrica (%)	16,5	27	29	20	40

Tabla 7. Análisis comparativo de consumos energéticos en edificios públicos (fuente: elaboración propia, 2023).

Legenda: ■ Valores muy desfavorables ■ Valores desfavorables ■ Valores intermedios ■ Valores favorables.

-a diferencia de la MOM- no se obtienen de fuentes primarias de información.

Cabe destacar que para el cálculo registrado en la tabla 5 se utilizaron las emisiones totales a lo largo de todo el ciclo de vida considerado en el análisis. Por lo tanto, dado que ND corresponde a personas por año, se infiere que el resultado debería dividirse en el límite temporal expuesto en el apartado objetivos y alcances, lo que arroja como resultado ND= 30 personas año.

Del análisis de la tabla 6 se infiere que los planes de acción -en relación con el incremento de la eficiencia energética- debieran orientarse a disminuir el consumo energético del edificio para alcanzar los niveles favorable y muy favorable. Al respecto, si se consideran los consumos energéticos de cuatro edificios públicos de Argentina analizados por la Secretaría de Energía en 2010 (tabla 7) -en los cuales se aplicaron estrategias orientadas a la rehabilitación energética- se obtiene que el CAA presenta un consumo energético por metro cuadrado "muy desfavorable", superior en 357 % a aquél del edificio de oficinas de Jujuy, que posee mayor superficie. No obstante, en Álvarez y Ripoll (2018) se analizan distintos emprendimientos urbanos de vivienda en el AMSJ, dentro de los cuales se encuentra el barrio Valle Grande, situado a 8,3km del CAA. Al respecto, se obtiene que las emisiones de carbono asociadas al CAA corresponden a aproximadamente el 2 % de las emisiones de CO₂ promedio de un conjunto habitacional estándar de 1000 viviendas. En otras palabras, las viviendas del barrio Valle Grande generarán -a lo largo de su ciclo de vida- 5025 % más emisiones de CO₂ que el edificio caso de estudio de esta investigación.

Cabe destacar que, a nivel provincial y nacional, no existen otras investigaciones relacionadas con el análisis de ciclo de vida de un edificio público sustentable. Por tal razón, como referencia para la fase de interpretación de los resultados, el análisis se realiza a partir de considerar trabajos publicados relativos a, por un lado, la tipología residencial y por otro, edificios

de oficina. En el caso de estos últimos, se hace hincapié en que se utiliza la variable kWh/m² como parámetro para la comparación, por ser el único valor generalizable. No obstante, si bien los ejemplos adoptados para el análisis no presentan las mismas características morfológico-funcionales, ni surgen en respuesta a condiciones climáticas similares, permiten contextualizar los resultados alcanzados y objetivar el impacto del CAA.

CONCLUSIONES

La investigación realizada aporta a generar datos referidos al análisis de ciclo de vida de edificios públicos en general, y en particular a aquellos localizados en zonas áridas. En este sentido, la rigurosidad climática del árido implica condiciones de uso específicas que condicionan el diseño y las características

constructivas de sus edificios, lo cual resulta determinante del consumo energético posterior de los mismos. De manera que, conocer los impactos asociados a la edificación permite establecer una línea base a partir de la cual puedan gestionarse planes de acción orientados a la mitigación y adaptación al cambio climático, relativos a una temática sobre la cual no se ha avanzado en la sistematización y contextualización de la información. Sin embargo, los resultados alcanzados involucran un proceso iterativo de revisión, actualización, validación y retroalimentación cuya interpretación implica un enfoque relativo basado en efectos ambientales potenciales que no predicen impactos reales.

Con base en lo antedicho, se concluye que, desde una perspectiva metodológica, es fundamental sistematizar la información

energética de los edificios públicos con el fin de alcanzar mayores niveles de confiabilidad en los resultados obtenidos y mejoras en la eficacia de los softwares aplicables al ACV. Esto debería constituir un estudio habitual cuya información se procese anualmente y del cual surjan propuestas orientadas al mejoramiento de los planes de mantenimiento y operación de los equipos.

En el caso particular del edificio caso de estudio, establecer dichas propuestas requiere de la valoración de aspectos tales como tiempo de los recorridos, cantidad de uso de los juegos por parte de los visitantes, aporte real de la energía renovable a la reducción del consumo energético del edificio, actualización de las actividades que se realizan en el edificio y sus respectivas necesidades energéticas, entre otros. ▲●●

REFERENCIAS

- Álvarez, A. y Ripoll Meyer, V. (2018). Matriz de referencia para la optimización del ciclo de vida de los materiales constructivos de la vivienda social en zonas árido-sísmicas. *Revista Hábitat Sustentable* 8: 52-67. doi.org/10.22320/07190700.2018.08.02.04
- Botejara-Antúnez M., González-Domínguez J. y García-Sanz-Calcedo J. (2022). Comparative analysis of flat roof systems using life cycle assessment methodology: Application to healthcare buildings. *Case Studies in Construction Materials* 17: doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01212
- Cai H., Wang X., Kim J.H., Gowda A., Wang M., Miade J., Farbmán S. y Leung L. (2022). Whole-building life-cycle analysis with a new GREET® tool: Embodied greenhouse gas emissions and payback period of a LEED-Certified library. *Building and Environment* 209: 108-664. doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108664.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2019). Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad: 70 años de pensamiento de la CEPAL. *Libros de la CEPAL* 158. https://www.cepal.org/es/publicaciones/44785-recursos-naturales-medio-ambiente-sostenibilidad-70-anos-pensamiento-la-cepal
- Herrando M., Elduque D., Javierre C. y Fuego N. (2022). Life Cycle Assessment of solar energy systems for the provision of heating, cooling and electricity in buildings: A comparative analysis. *Energy Conversion and Management* 257: 115402. doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115402.
- Joliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet Jérôme, Rebitzer G. y Rosenbaum R. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 8: 324-330. doi.org/10.1007/BF02978505
- Kavitha B. y Molykutty M.V. (2021). Life cycle energy analysis of a glazed commercial building using building information modelling (BIM) tools. *Materials Today: Proceedings* 37: 940-946. doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.148.
- Li S., Rismanchi B. y Aye L. (2023). Scenario-based analysis of future life cycle energy trajectories in residential buildings-A case study of inner Melbourne. *Building and Environment* 230: 109955. doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109955.
- Macías J., Iturburu L., Rodríguez C., Agdas D., Boero A. y Soriano G. (2017). Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador. *Energy and Buildings* 151: 107-120. doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.016.
- Mercader Moyano, M., Camporeale P.E. y Cózar-Cózar E. (2019). Evaluación De Impacto Ambiental Mediante La introducción De Indicadores a Un Modelo BIM De Vivienda Social. *Hábitat Sustentable* 9 (2):78-93. https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.02.07.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2023). *Quinto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/5to%20Informe%20de%20Actualizaci%C3%B3n%20de%20la%20Rep%C3%BAblica%20Argentina.pdf
- Minunno R., O'Grady T., Morrison G. M., Gruner R. L. (2021). Investigating the embodied energy and carbon of buildings: A systematic literature review and meta-analysis of life cycle assessments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 143: 110935. doi.org/10.1016/j.rser.2021.110935.
- Mukkavaara J. y Shadram F. (2021). An integrated optimization and sensitivity analysis approach to support the life cycle energy trade-off in building design. *Energy and Buildings* 253: 111529. doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111529.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2020). *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT_v2.pdf.
- Quispe Gamboa, C. N. (2016). *Análisis de la Energía Incorporada y Emisiones de CO₂ aplicado a viviendas unifamiliares de eficiencia energética* [Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña] https://www.waie.webs.upc.edu/maema/wp-content/uploads/2016/10/Quispe-Gamboa-Claudia-Nataly.pdf
- Rabani M., Bayera Madessa H., Ljungström M., Aamodt L., Lövsold S., Nord N. (2021). Life cycle analysis of GHG emissions from the building retrofitting: The case of a Norwegian office building. *Building and Environment*. Volume 204. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108159.
- Röck, M., Hollberg, A., Habert, G. y Passer, A. (2018). LCA and BIM: Integrated assessment and visualization of building elements' embodied impacts for design guidance in early stages. *Procedia CIRP*, Volume 69. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.087.
- Secretaría de Energía de Argentina. (2010). *Programa de Uso racional y Eficiente de la Energía en Edificios Públicos. Resultados de las unidades de demostración*. Programa de Ahorro y Eficiencia Energética en Edificios Públicos. https://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/eficiencia/2016/informe_unidades_demostracion_ee.pdf
- Zhou Y., Tam Vivian WY., Le Khoa N. (2023). Sensitivity analysis of design variables in life-cycle environmental impacts of buildings. *Journal of Building Engineering* 65: 105749. doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105749.