

Economía Circular en Gestión de Unidades de Transporte Público: Caso Sonora

Javier Esquer Peralta ^{1*}, Juan Pedro Ayala Moreno ², Rebeca Ruiz Bustos ³, Héctor Manuel Guzmán Grijalva ⁴, Nora Elba Munguía Vega ⁵

RESUMEN

El enfoque de movilidad sustentable considera, entre otros, el ciclo de vida de los medios de transporte utilizados. Al final de su vida útil, estos vehículos generan grandes volúmenes de residuos sólidos. En este artículo se analiza la posible extensión de la vida útil de medios de transporte público en desuso a través de un anteproyecto arquitectónico con una segunda alternativa de uso. Se propone el uso de equipamiento bioclimático en elementos con potencial de reutilización. Se aplican diversas herramientas, como la Matriz de Leopold, para ponderar sus potenciales impactos contrastando el uso de materiales comunes. Los hallazgos demuestran el impacto positivo significativo de la reutilización de las unidades. Se concluye que el desarrollo de la alternativa de reutilización es positivo en los tres componentes, físico, biológico y socioeconómico, en comparación con una alternativa similar analizada con especificaciones de materiales de uso común en la zona.

Palabras clave: Transporte Público; Economía Circular; Matriz de Leopold; Diseño Bioclimático

¹ Doctor en Ciencias, Posgrado en Sustentabilidad / Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, javier.esquer@unison.mx, ORCID <https://orcid.org/000-0002-3031-1104>.

² Doctor en Humanidades, Posgrado en Sustentabilidad / Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, juan.ayala@unison.mx, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7708-4113>.

³ Maestra en Sustentabilidad, Posgrado en Sustentabilidad / Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, rebeca.ruiz.bustos@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0009-0001-1504-8002>.

⁴ Doctor en Ingeniería Ambiental, Posgrado en Sustentabilidad / Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, hector.guzman@unison.mx, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5219-4757>.

⁵ Doctora en Ciencias, Posgrado en Sustentabilidad / Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, nora.munquia@unison.mx, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2352-3165>

Autor de Correspondencia: Dr. Javier Esquer Peralta, javier.esquer@unison.mx

Recibido: 22 / 05 / 2025

Aceptado: 26 / 08 / 2025

Publicado: 07 / 10 / 2025

Cómo citar este artículo:

Esquer Peralta, J., Ayala Moreno, J. P., Ruiz Bustos, R., Guzmán Grijalva, H. M., & Munguía Vega, N. E. (2025). Economía Circular en Gestión de Unidades de Transporte Público: Caso Sonora. *EPISTEMUS*, 19(38). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v19i38.439>

Circular Economy in the Management of Public Transportation Units: The Case of Sonora

ABSTRACT

The sustainable mobility approach considers, among other aspects, the life cycle of the means of transport used. At the end of their service life, these vehicles generate large volumes of solid waste. This paper analyzes the potential extension of the service life of decommissioned public transportation units through an architectural project offering a second- use alternative. The proposal includes bioclimatic equipment for components with potential reuse. Various tools, such as the Leopold Matrix, are applied to assess potential impacts by comparing the use of common materials. The findings demonstrate a significant positive impact from the reuse of these units. It is concluded that the development of the reuse alternative yields positive outcomes across physical, biological, and socioeconomic components, compared to a similar alternative analyzed using commonly used materials in the region.

Key words: *Public Transportation; Circular Economy; Leopold Matrix; Bioclimatic Design*



INTRODUCCIÓN

Actualmente, la planeación de las ciudades ha priorizado el beneficio de la circulación de los vehículos de motor, generando la creación de un sistema de transporte público que se refleja con un porcentaje del 42% del total del movimiento vehicular en las áreas metropolitanas en Latinoamérica [1]. Además, se han detectado problemas en la planeación urbana que reclaman políticas enfocadas al sector transporte con resultados efectivos y sostenibles [2]. El promedio de vida del transporte público fluctúa entre 8 a 17 años sin necesariamente tener un alto costo de reparación; después se sustituye para no crear un déficit monetario en su operación [3], generando así residuos de vehículos de forma exponencial [4].

Los componentes de los vehículos residuales (75 % metal, y el resto neumáticos, líquidos y otros materiales) pueden ser aprovechados en diversos ámbitos reduciendo así emisiones contaminantes [5], [6]. Sin embargo, siempre existirá un porcentaje de residuos de vehículos sin aprovechamiento cuya forma principal de disposición final es mediante la incineración [7]. Lo anterior empuja a crear mecanismos que permitan extender su vida aplicándolos en otros rubros [8]. Es aquí donde entra el concepto de economía circular para aumentar tanto el valor como la utilidad de los recursos utilizados en la fabricación de productos antes del final de su vida útil [6].

Una forma de administrar los recursos es mediante la estrategia de las tres “R”, refiriéndose las primeras dos al reuso y reciclaje de materiales, catalogados como parte de una reinversión dentro de la economía circular, y la tercera aborda la reducción de materiales y residuos [9]. En 2023, se publicó en México la “Guía práctica para la chatarrización de vehículos al final de su vida útil (VFVU)” [10], que propone un modelo de negocio circular que incluye clústeres de armadoras de vehículos, centros autorizados de tratamiento de VFVU, y empresas de tratamiento y reciclaje, favoreciendo así escenarios hacia el desarrollo sostenible con el desarrollo de nuevos productos y mediante la generación de nuevos modelos de negocios [11].

El objetivo de este artículo es realizar un análisis de la extensión de la vida útil del transporte público descartado mediante el desarrollo de un anteproyecto arquitectónico con un segundo uso alternativo, comparando sus resultados contra los de un anteproyecto similar, con los mismos

alcances, pero con uso de materiales comunes. Se aplicó una metodología con el uso de diversas matrices para ponderar los impactos que las actividades de construcción provocarían sobre a los componentes físicos, biológicos y socioeconómicos.

MÉTODOS

La metodología general consiste en cuatro fases generales, mismas que a continuación se describen y se explican de forma gráfica en la **Figura 1**.

Fase A. Recabar información general sobre la propiedad donde se propone la construcción del anteproyecto arquitectónico, tal como ubicación, climatología, datos de materiales, y otros datos; así como la definición del programa arquitectónico para dar forma al anteproyecto base.

Fase B. Desarrollo de 2 alternativas de anteproyecto arquitectónico, cada una con sus especificaciones distintas.

Fase B.1. Generar alternativa 1 correspondiente a propuesta de anteproyecto arquitectónico con uso de materiales comunes. Se aplicó la fórmula del factor de iluminación natural (FIN) de [12] para la evaluación de iluminación interior, según la ecuación (1). Se analizó el confort térmico interior de la propuesta mediante el uso del software Ener-habitat [13]. También se usó el software sketchup [14] para simular el comportamiento de sombras de la vegetación propuesta sobre la edificación, y con ayuda del software Sol-Ar [15] se analizaron los asoleamientos de las fachadas principales.

$$FIN_{promedio} = TAw \theta / [A (1 - R^2)] \% \quad (1)$$

Donde:

T = Transmitancia del Vidrio

Aw = Área neta vidriada de las ventanas (m²)



A = Área total de las superficies

R = Reflectancia promedio

Θ = Ángulo visible del cielo en grados

Fase B.2. Generar alternativa 2 correspondiente a propuesta de anteproyecto arquitectónico de reutilización, partiendo de la adecuación del cuerpo de un vehículo de transporte público urbano descartado aplicando criterios de diseño bioclimático. Se aplicó la misma metodología de la **fase B.1**.

Fase C. Evaluación del impacto ambiental de las dos propuestas, **parte 1**. Se especificaron las actividades o partidas a ejecutarse de acuerdo con el programa arquitectónico de la alternativa en cuestión. Se definieron las escalas de ponderación numérica para la evaluación de los puntos anteriormente descritos, tanto en magnitud, según ecuación **(2)**, como en importancia, según ecuación **(3)**, de cada uno de los impactos de las actividades necesarias para la ejecución de la alternativa.

$$\text{Magnitud final en unidades homogéneas} = f(\text{MagnitudCON en unidades heterogéneas}) - f(\text{MagnitudSIN en unidades heterogéneas}) \quad (2)$$

$$Im = \pm(A + E + In + P + Rv + Rc) \quad (3)$$

Donde:

Im = Importancia

$+$ = Impacto positivo

$-$ = Impacto negativo

A = Acumulación

E = Extensión

In = Intensidad

P = Persistencia

Rv = Reversibilidad o medios naturales

Rc = Recuperabilidad o medios humanos

Fase D. Evaluación del impacto ambiental de las dos propuestas, **parte 2**. Se vaciaron los datos obtenidos a la matriz de Leopold [16] para obtener ponderaciones en los componentes físicos, biológicos y socioeconómicos. Posterior a ello, se desarrolló un análisis comparativo de los resultados de ambos estudios de impacto ambiental llevado a cabo en la tercera fase, así como el análisis de los resultados sobre confort térmico interior, iluminación interior y sombreado de vegetación de cada alternativa desarrollada.



Figura 1. Representación gráfica de fases de la metodología aplicada

Fuente: Elaboración propia



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fase A: recolección de datos.

La elección del uso alternativo para las unidades descartadas surgió del interés el Gobierno del Estado para posibles instalaciones de biblioteca rural. El objeto de estudio se tomó de la caracterización del inventario de los vehículos de transporte urbano descartado que se realizó en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México.

Territorio y características

El Estado de Sonora es el marco para el desarrollo de la propuesta. Para efectos del análisis presentado en este artículo, el criterio para la selección del poblado rural se determinó con la media poblacional sobre el total de habitantes en Sonora (2 944 840.00 de habitantes), es decir, la población que contabilizara alrededor de 1,780.00 habitantes. El municipio que cubre el criterio es Banámichi, con un total de 1,825.00 habitantes. Dicha localidad cuenta con una biblioteca pública que cubre la demanda de 59 localidades y cuenta con un total de 5 escuelas, siendo una escuela de nivel preescolar, una de nivel primaria, una de nivel secundaria y una escuela de nivel medio superior [17].

Información sobre clima

El 48% del estado presenta clima seco y semiseco. La temperatura media anual fluctúa alrededor de 22°C, llegando a alcanzar en los meses de junio y julio temperaturas de hasta 50°C. En el municipio de Banámichi, la temperatura mínima promedio es de 13.5°C, siendo los meses de enero, febrero y diciembre los meses más fríos. La temperatura máxima promedio, es de 30.8°C, teniendo como los meses más calurosos junio, julio y agosto. La precipitación normal es de 469.7 mm anuales, presentándose más lluvias en los meses de julio y agosto [18].

Educación

En Banámichi, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía [19], el porcentaje de analfabetismo promedio es de un 2.33%, 50% hombres y el 50% mujeres. Se considera población analfabeta a la población de 15 años y más que no sabe leer ni escribir.

Información medio ambiental

Las emisiones per cápita de gases de efecto invernadero (GEI) son generadas en la mayoría de las regiones grandes de México. En el 2019 se tuvo un estimado de 3.47 toneladas de bióxido de carbono equivalente (tCO₂e) per cápita, por debajo de 4 tCO₂e per cápita. En las regiones pequeñas hasta el año 2018, las emisiones fluctuaron entre 3 tCO₂e y 9 tCO₂e, distribuidas en los rubros de agricultura, energía, industria, residencial y transporte [20], [21].

En este trabajo el indicador utilizado para ponderar la magnitud sobre las emisiones generadas durante el funcionamiento de la edificación se calculó con la información de emisiones GEI per cápita de las regiones no metropolitanas próximas a una ciudad. Dicha cifra fluctúa alrededor de 4 tCO₂e, que multiplicado por la cantidad de habitantes de la población de Banámichi, resulta una cantidad heterogénea de 7,300 tCO₂. Según el anteproyecto arquitectónico analizado, se ajustó la emisión anteriormente descrita considerando un lapso de 12 meses de ejecución y el cálculo para las emisiones generadas por el uso de retroexcavadora para la limpieza del terreno; se calculó con un consumo de 25 litros de gasóleo por hora, requiriéndose 3 horas para la limpieza del predio en 3 ocasiones al año.

Normatividad

Sobre la aplicación de leyes y reglamentos para el desarrollo de las alternativas se tomó en cuenta el Reglamento de Construcción Municipal en donde se mencionan las restricciones tanto de ubicación de la edificación como la altura total que las edificaciones deben de respetar. Se consideraron las normas de seguridad para la construcción de cada alternativa, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM) NOM-031-STPS-2011 en temas de higiene y seguridad en el trabajo [22].



Se estimaron las emisiones potenciales de ruido que genera cada herramienta y/o equipo durante la construcción, mediante el uso de indicadores de acuerdo con la información consultada de la NOM correspondiente La Ley General de Archivo [23], indica que el funcionamiento de la institución que resguarda cualquier acervo cultural debe de contar con una organización interna del personal que maneje correctamente la biblioteca, así como mantener en buen estado dicho acervo.

La “Norma para Bibliotecas de Instituciones de Educación Superior e Investigación” [24] especifica las características físicas que deben de cumplir las instalaciones, las adecuaciones de temperatura e iluminación y el porcentaje de temas del acervo que deben incluirse en las bibliotecas para su correcto funcionamiento.

Caracterización del inventario de unidades de descarte

El modelo tipo de la unidad utilizado para este estudio es Mercedes Benz, con un peso aproximado de 15,000 kg por unidad. Estos se encuentran en el predio ubicado al sur de la ciudad de Hermosillo, Sonora, contabilizándose alrededor de 150 unidades, unas con mayor deterioro que otras (ver **Figura 2**).

Actualmente, las unidades de transporte público en desuso se almacenan en espacios abiertos donde se ha documentado la ocurrencia de actos vandálicos. Este contexto plantea una problemática adicional relacionada con la seguridad y el deterioro progresivo de los vehículos. En este sentido, su reutilización como bibliotecas fijas no solo contribuye a su aprovechamiento funcional, sino que también reduce el riesgo de vandalismo asociado al abandono y almacenamiento prolongado.



Figura 2. Foto del área de almacenaje de vehículos de descarte, en Hermosillo, Sonora

Fuente: Elaboración propia

Zonificación primaria

Se consultaron las medidas interiores de los camiones urbanos que reporta el fabricante y se corroboraron medidas en sitio para desarrollar una propuesta de distribución de una biblioteca rural. Respetando las medidas básicas de antropometría de acuerdo con [25], se proponen muebles dentro del espacio interno de las unidades y se respetaron las medidas mínimas para lograr una circulación adecuada, teniendo como resultado una distribución de 3 mesas con 4 sillas individuales cada una; espacio suficiente para colocar el material de consulta mediante el uso de estantes y la ubicación de un espacio para la persona responsable de la instalación o bibliotecario, consistente en un escritorio y una silla, en una superficie total de 32.50 m² (ver **Figura 3**).



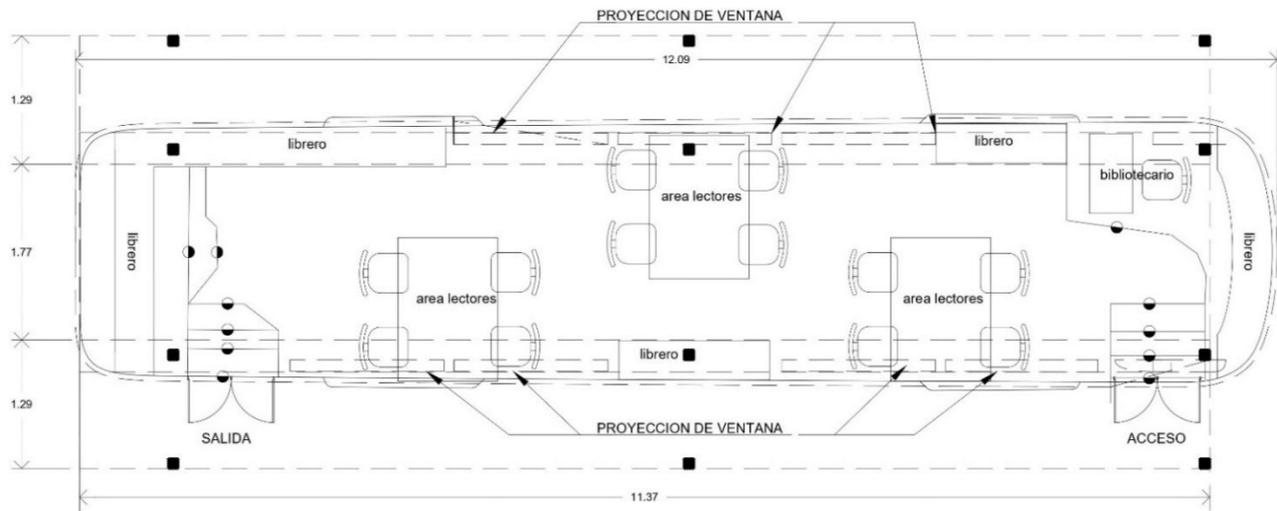


Figura 3. Distribución de Anteproyecto

Fuente: Elaboración propia

Fase B / Alternativa 1: Propuesta con uso de materiales comunes

El interior de los camiones tipo tiene una superficie total de 32.50 m² representada en la **Figura 3**, en donde se desarrolló una alternativa o anteproyecto arquitectónico equivalente en área y mobiliario, especificando el uso de materiales comunes en la zona. Estos materiales son concreto y varilla de acero en losa de cimentación, capa de 5 cm de concreto, varilla de acero, viga y casetón en losa de azotea, y muros de block de 12 cm de espesor. Se respetó tanto la superficie de construcción, como el tipo y cantidad de mobiliario que se utilizó en la opción de reúso de los camiones urbanos, como se observa en la **Figura 4**.

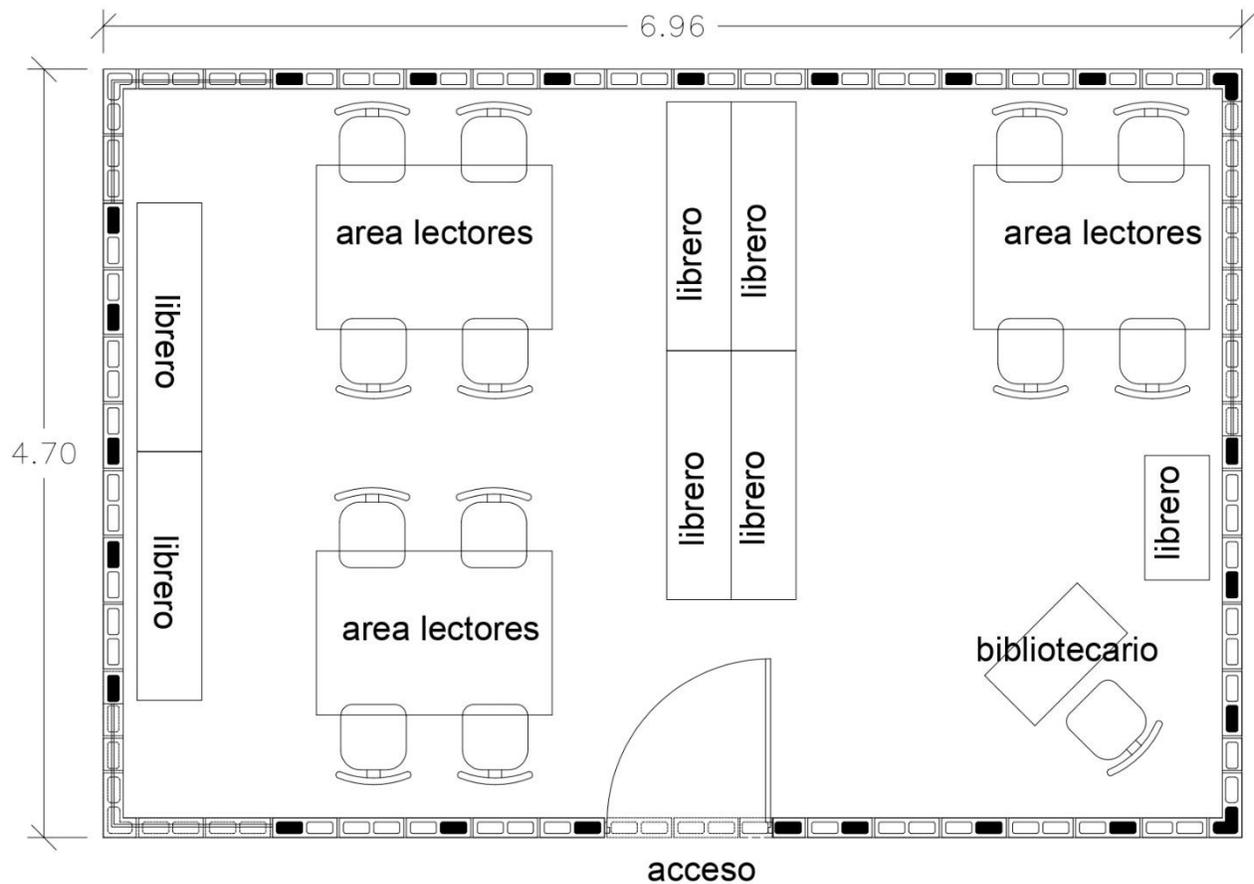


Figura 4. Representación de planta arquitectónica de la edificación con propuesta de uso de materiales comunes

Fuente: Elaboración propia

Iluminación interior natural

En esta alternativa se proyectaron ventanas localizadas en puntos estratégicos para dar una iluminación al área de lectura y permitir una ventilación natural adecuada. Se logró ubicar dos ventanas fachada norte y sur con dimensiones iguales de 1.12 m por 0.81 m, dos ventanas en fachada oeste con mismas dimensiones de 1.12 m por 0.69 m, y una ventana ubicada sobre fachada este con dimensión de 1.12 m por 2.05 m (ver **Figura 4**). Para las ventanas en esta



propuesta no se proyectaron protecciones solares, por lo que el resultado del cálculo obtenido del Factor de Iluminación Natural (FIN) (1) fue de 3.22%.

Sombras

Se estudió el comportamiento de las sombras en la edificación, utilizando el software Sol-Ar [15]. Debido a que la propuesta no utiliza elementos que protejan a la edificación del sol, el resultado obtenido fue ausencia de sombreado.

Análisis térmico interior

Los sistemas constructivos que se analizaron en el programa simulador Ener-habitat [13] fueron 3. En el primer sistema, correspondiente a esta alternativa, se especificó el uso de concreto en losa de azotea, muros de block y acero. El segundo sistema se analizó con el uso de lámina de aluminio y aplicación de fibra de vidrio, que representa el estado actual del techo de las unidades de transporte. El tercer sistema corresponde a la alternativa de segundo uso de las unidades descartadas de transporte público, este se propone con la inclusión de poliuretano en el exterior, sobre la lámina de aluminio y al interior fibra de vidrio. Todas las propuestas se simularon sin uso de aire acondicionado (ver **Figura 5**).

En la simulación se obtuvo que el sistema constructivo especificado con el número 2, es el que obtuvo un mayor factor de decremento en promedio anual, tanto en muros como se observa en la **Figura 5 “b”**, como en losa (ver **Figura 5 “a”**). En ambas gráficas anteriormente descritas, se muestra un factor de decremento similar entre los sistemas 1 y 3 en muros, es decir, que muestran una ventaja de comportamiento térmico interior con respecto al sistema constructivo 2. En losa se obtuvo una diferencia entre los factores de decremento de los sistemas 1 y 3, pero obteniendo un mayor factor de decremento en el sistema constructivo 2. De igual forma, la gráfica mostrada en la **Figura 5 “c”**, se observan las variantes en cuanto a temperatura que se obtuvo en el simulador.

mención del uso apropiado de materiales que sean de mayor beneficio térmico. Por lo tanto, se proyectó una orientación sur de la fachada principal (ver **Figura 6** y **Figura 7**).

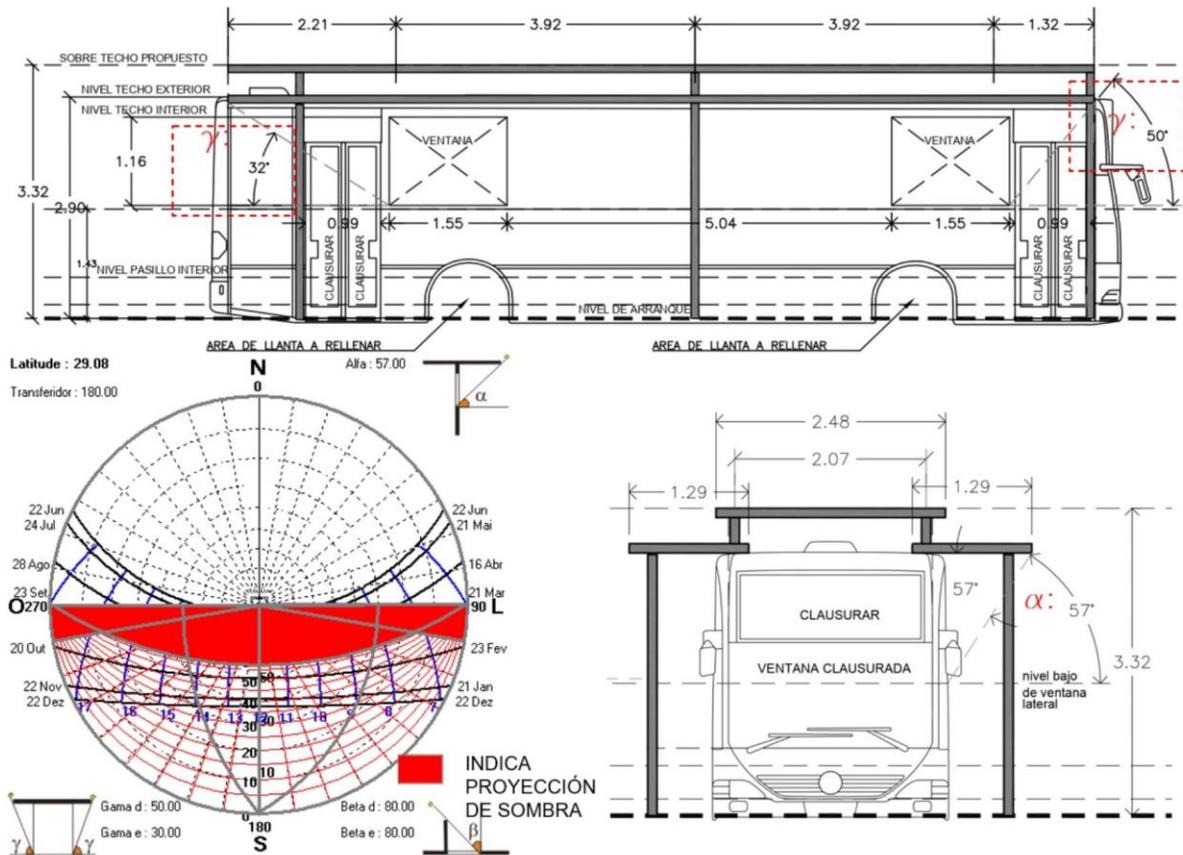


Figura 6. Análisis de protecciones solares en carta solar estereográfica y representación de aleros y techo doble

Fuente: Elaboración propia con ayuda de software Sol-Ar [15]

Se consideró el uso de sistemas pasivos para proteger la estructura de las radiaciones solares y también lograr una iluminación natural adecuada hacia el interior, de acuerdo con [27]. Estos sistemas consisten en el uso de un techo doble ventilado sobre la estructura del vehículo y la

ubicación de unos aleros laterales a lo largo del cuerpo vehicular, con un ancho de 1.30 m (ver **Figura 6** y **Figura 7**).

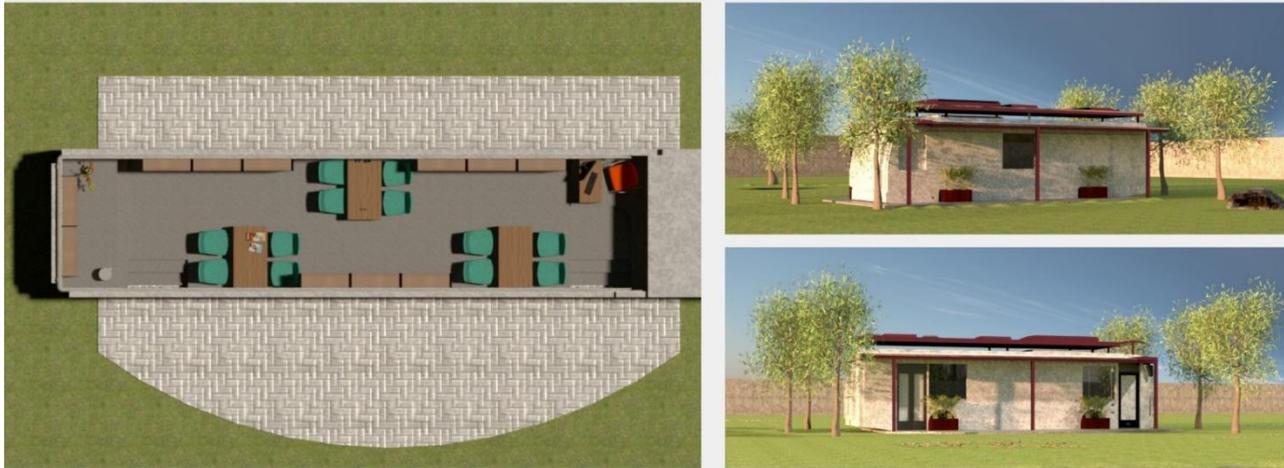


Figura 7. Representación en planta de la edificación y perspectivas de la propuesta de anteproyecto con reutilización

Fuente: Elaboración propia en software Sketchup [14] y V-ray [28]

Iluminación interior natural

En la propuesta de anteproyecto de reutilización, se ubicaron ventanas de dimensiones iguales de 1.16 m, por 1.55 m, dos unidades ubicadas sobre fachada sur y otra unidad ubicada sobre fachada norte. Esto permite una ventilación cruzada al interior del inmueble y una iluminación correcta. De acuerdo con la normativa para la obtención de un adecuado porcentaje de iluminación natural [24], se aplicó la fórmula (1) para la obtención del factor de iluminación natural (FIN). El valor obtenido en la fachada con ventanas más susceptibles a los rayos solares fue de 3.19%, encontrándose dentro del rango deseable de 3% y 6%.

Vegetación

Con el fin de complementar el uso de sistemas pasivos para evitar el calentamiento interior de la edificación, se propuso la ubicación de tres árboles en los extremos oriente y poniente, logrando



proyectar sombreado sobre la edificación en el mes más crítico de altas temperaturas en Banámichi (julio).

Sombras

Se simuló el comportamiento solar sobre la infraestructura cuidando que los rayos del sol no accedieran directamente por las ventanas mediante la ubicación de aleros laterales con una longitud de 1.30 m y altura de 2.90 m. Lo anterior cumplió con la función de sombreado sobre la edificación en el mes crítico de julio en Banámichi, en ambas fachadas longitudinales.

- La fecha clave analizada considerando que se requiere de un asoleamiento menor **para provocar** bajas temperaturas en el interior, es en el mes de **junio** a las 10:00 horas y en el mismo mes a las 14:00 horas.
- La fecha clave analizada considerando que se requiere de un asoleamiento mayor para **no provocar** bajas temperaturas en el interior, es en el mes de **diciembre** a las 10:00 horas y en el mismo mes a las 14:00 horas.

Análisis térmico interior

Utilizando el programa de simulación Ener-Habitat [13], se realizó simulación sobre confort térmico interior, en donde la información de sistema no. 3 perteneciente a esta propuesta, logró un mayor valor bajo de decremento (ver **Figura 5**).

Fase C: Análisis de actividades a realizarse en cada alternativa

Se especificaron las actividades o partidas generales necesarias para la ejecución de cada alternativa, dividiéndose en 4 fases principales que describen sus labores y acciones correspondientes.

Dichas fases consisten en, **primero**, especificar las actividades preliminares para preparación del terreno a construirse. La **segunda** fase considera las actividades necesarias para poder habilitar el área y/o ejecución de la nueva edificación. La **tercera** fase abarca las acciones necesarias para el funcionamiento y mantenimiento de la edificación, en un lapso de 50 años. La **última** fase, describe las acciones necesarias para derrumbar la infraestructura.

Adicionalmente, en la propuesta utilizando materiales comunes, se sumaron también los impactos relacionados con la existencia de los camiones en el sitio, bajo el supuesto de que continúen en el mismo predio de almacenamiento.

De acuerdo con la bibliografía consultada de proyectos similares al presente trabajo, se tomaron en cuenta los componentes físicos, biológicos y socioeconómicos afectados. Dentro de los componentes físicos, se detectaron afectaciones en el aire (emisiones de bióxido de carbono, ruido y olores), agua (cambio de drenaje superficial y desperdicio de agua) y suelo (productividad y afectaciones por suministro de materiales de construcción y/o extracción de materia prima). Dentro de los componentes biológicos, se detectaron afectaciones en la flora y fauna (afectación de vegetación nativa y productividad) y paisaje (destrucción de componentes dentro del entorno, modificación visual del entorno e incorporación de nuevos elementos). Dentro de los componentes socioeconómicos, se detectaron alteraciones en población (salud, generación de empleo, incidencia en servicios públicos y bienestar social) y en el ambiente urbano (incidencia en infraestructura). Se clasificó cada efecto provocado por actividad relacionada, mediante un análisis del procedimiento de construcción desde un punto de vista sustentable.

Se ubicó la afectación de cada actividad con la aplicación de una matriz de primer impacto para determinar la complejidad de los efectos (impacto compatible, moderado o severo) y se definió si el impacto relacionado es positivo o negativo al correspondiente componente afectado y/o alterado.

Posteriormente, se ponderó la magnitud provocada por cada actividad, mediante el análisis y aplicación de indicadores encontrados en diversas bibliografías ya existentes. Para los



indicadores de mayor subjetividad, se analizó con base a la experiencia en el campo y la relación existente entre la superficie involucrada en la propuesta con la extensión del área de estudio.

Se unificaron las unidades heterogéneas a unidad homogéneas de cada indicador, mediante la aplicación de la **fórmula (2)**, para poder evaluar todos los impactos con una unidad congruente entre todos los impactos relacionados. El límite superior de la magnitud y siguiendo con la metodología expuesta por Garmendia [29], se determinó como unidad homogénea el número 10. Ciertos valores dieron en decimales, pero aun así se vació la información obtenida en la matriz de Leopold [16], ya que la importancia obtuvo como resultado un número considerable.

Una vez obtenida la ponderación de la magnitud, se calculó la importancia del impacto utilizando la **fórmula (3)** de la valoración cualitativa simple.

La definición del valor de la acumulación se analizó de acuerdo con el procedimiento de construcción de cada actividad y la forma de interaccionar con otros efectos, mientras que la definición de los valores de la extensión en los componentes físicos y biológicos se ponderó con la proporción que la superficie de la poligonal de la propuesta representa en relación con el área del municipio de Banámichi. Para el componente socioeconómico se tomó el porcentaje representativo de la población de dicho municipio, multiplicado por la información estadística de la actividad económica del Estado de Sonora.

La intensidad se evaluó de acuerdo con la agresividad que el procedimiento de construcción provoca en el factor correspondiente afectado a diferencia de la persistencia, reversibilidad y recuperabilidad, que se analizaron de acuerdo con los efectos que cada actividad provoca al medio.

Cabe aclarar que pueden llegar a producirse distorsiones o asimetrías entre los datos o indicadores utilizados, puesto que las fuentes de información consultadas podrían no guardar coherencia entre sí, o la aplicación a la propuesta presentada en este trabajo contiene diferencias que pudieran afectar en los resultados.

Fase D: Evaluación de impacto ambiental de cada propuesta de anteproyecto

Obtenidos los valores tanto de magnitud como de importancia del impacto de cada actividad, se procedió al llenado de matriz de Leopold [16] para la evaluación general del impacto que tendría la ejecución del anteproyecto propuesto, cruzando las ponderaciones tanto en magnitud como en importancia, de acuerdo con la metodología. A continuación, se muestran los resultados de los impactos de ambas propuestas.

En la propuesta utilizando materiales comunes, se obtuvo un impacto en los factores físicos, de -839.5 puntos. En los factores biológicos, el valor obtenido del análisis fue de -218.8 puntos, mientras que, en los factores socioeconómicos, el valor obtenido fue de 908.94 puntos. El número total de alteraciones negativas, fueron 104 y 67 factores resultaron alterados positivamente. La ponderación total de la propuesta del anteproyecto fue de -149 puntos, como se muestra en la

Figura 8.



Componentes	Factores ambientales	PRELIMINARES			CONSTRUCCIÓN (HABILITADO)					FUNCIONAMIENTO				DERRUMBE			MAGNITUD			Impactos por subcomponentes	Impacto por componente	Impacto total del proyecto	
		Desmantelamiento de camiones y retiro de chatarra	Preparación del terreno, limpieza y nivelación de Palanoma para recibir módulos	Recepción de módulos en sitio (transporte, izado y colocación)	Excavación de zanjas, retiro de material excedente	Colocación de infraestructura para servicios a módulo	Instalación de elementos reutilizados de los módulos	Suministro e instalación de protecciones a los elementos reutilizados (apilado, de asfaltos, acabados)	Limpieza general de obra	Espacios comunes, cubierta, acabados, fachadas, revestimientos	Mantenimiento de electricidad, iluminación, climatización	Traffic de vehículos en el exterior	Generación de aguas residuales	Derrumbe de construcción	Desmantelamiento de instalaciones	Retiro de escombros	Restauración de terreno	Factores alterados (+)	Factores afectados (-)				Promedios aritméticos (magnitud x importancia)
Físico	Aire	Emisión de CO2	0	0.1	4	0	0	4.5			0	0	0	1.7	3	0.9	4.5	8	0	-178.35	-694	-755.1	820
		Ruido	-10	-10	-10	-10	-10	-10			-10	-10		-10	-9	-9	-9	10	0	-515.94			
		Olores	7.4	7.4	7.4	0.5	7.4	7.4	6.3	0		0	0	9	9	6.8							
	Agua	Cambio drenaje superficial	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8									1	0	-0.06			
		Desperdicio de agua				0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		2	0	-12.3			
	Suelo	Daño por destrucción directa																0	0	0			
		Productividad	0	0	0	0	0				0	1.1						6	0	-47.52			
		Afectación por suministro de materiales de construcción	-6	-9	-9	-10												1	0	-0.9			
		Afectación de vegetación nativa				0.1	0											0	0	0			
	Biológico	flora y fauna	Productividad	5.8	0.1	0.1	0	0										6	0	-11.68			
Afectación de vegetación nativa			-8	-8	-8	-8	-8	-6										0	0	0			
Paisaje		Productividad	1.5														1	0	12				
		Destrucción de componentes en el entorno	-8					2	6								1	0	189				
		Modificación visual del entorno	10	10	2.5	2	2	2	2								10	0	48				
Socioeconómico	Población	Incorporación de nuevos elementos	6	6	6	8	6	8									3	0	249				
		Salud	0.4														0	0	0				
		Generación de empleo	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0	0	0	10	0	40				
	Urbano	Educación	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	1	0	100				
		Incidencia en servicios públicos			10		10	10	10								4	0	390				
		Bienestar social	10				10	10	10								9	0	570				
IMPORTE	Factores alterados (+)	Factores alterados (+)	4	2	4	3	6	7	4	1	3	2	2	0	2	1	6	3	50				
		Factores afectados (-)	6	4	5	5	6	3	3	3	2	3	4	3	11	4	3	3	68				
		Promedios aritméticos	51.12	3.42	49.24	30.6	217.04	209.74	222.54	4	182.7	91.2	41.4	-135.06	-145.28	-180.25	152.77	24.77			819.95		
		Impacto por labor	103.78					683.92				180.24			-147.99								
Impacto total del proyecto																	819.95						

Figura 9. Matriz de Leopold para estudio de impacto ambiental causado por propuesta de reutilización de estructuras reformadas

Fuente: Elaboración propia modificado de Garmendia [29]

Análisis de resultados de alternativas desarrolladas

La superficie en la que se desarrollaron ambas alternativas fue de una extensión equivalente, con ciertas diferencias debido a la modulación que se tiene sobre la construcción de block correspondiente a la alternativa 1. Esta superficie es aproximadamente de 32.50 m² que es la superficie útil dentro de las carcasas de los camiones urbanos descartados.



La ocupación resultante en ambas alternativas fue de 12 lectores distribuidos en 3 mesas, más un escritorio para el encargado del funcionamiento de la biblioteca, con una superficie total para la zona de acervo de 19.50 m² en la alternativa 1, y de 24.60 m² para la alternativa 2. En la alternativa 1 la distribución del mobiliario logra un 26.83% del área total para espacio de lectura colectiva, mientras que en la alternativa 2, el porcentaje para lectura colectiva logra un 24.92% y para lectura informal un 4.00%.

Con la premisa de simplificar la adaptación de las unidades de transporte público y evitar un incremento de los impactos ambientales, ninguna de las dos propuestas contempla la incorporación de servicios sanitarios ni de una rampa de acceso para personas con discapacidad.

Sobre la iluminación natural, el factor obtenido en la alternativa 1, fue de 3.22%, mientras que el factor obtenido en la alternativa 2, fue de 3.19%. En la alternativa 1 no se consideró sombreado en la edificación por medio de vegetación, al contrario, como se consideró en la alternativa 2.

En lo que respecta a confort térmico interior, el software con el que se realizó la simulación reflejó gráficamente que el sistema constructivo 1 y 3 (S.C. 3) resultó con un factor de decremento menor, en comparación con el sistema constructivo 2. Es decir, que el sistema constructivo 1 especificado tanto en muro como en losa, es el correspondiente a los materiales especificados para la alternativa 2.1 "propuesta con uso de materiales comunes", mientras que el sistema constructivo 3, se refiere a los materiales especificados para la alternativa 2.2 "propuesta de reutilización en estructuras reformadas", por lo que el uso de cualquiera de los dos materiales, darían comportamiento térmico similar en muros, a diferencia en losa de azotea con 0.10 puntos a favor en el sistema constructivo 3.

En cuanto al análisis de impacto ambiental, la ponderación total obtenida en la alternativa 1 (-149.32 puntos), resultó con mayor negatividad que la ponderación obtenida de los impactos provocados por la ejecución de la alternativa 2 (819.95 puntos). De igual forma, en importancia la cantidad de factores impactados negativamente por la alternativa 1 (67 puntos), fue mayor a la cantidad de factores impactados negativamente en la alternativa 2 (50 puntos, ver **Tabla 1**).

Con el fin de ofrecer al lector una mejor comprensión de los resultados, es importante aclarar que los puntajes obtenidos a través de la matriz de Leopold, en su versión adaptada, no representan valores absolutos, sino estimaciones comparativas del impacto global de cada propuesta. En este caso, el valor positivo obtenido por la propuesta de reutilización (820 puntos) sugiere una predominancia de efectos favorables, derivados no solo de beneficios ambientales, como la reducción de residuos y el aprovechamiento de materiales existentes, sino también de aspectos sociales y comunitarios vinculados con el acceso a espacios culturales. Por el contrario, el valor negativo asignado a la alternativa convencional (-149 puntos) refleja una mayor concentración de impactos desfavorables. Esta comparación permite dimensionar de forma más clara el potencial de la reutilización como estrategia integral con beneficios ambientales y socioeconómicos (ver figura 10).

Comparación de impactos por tipo de construcción

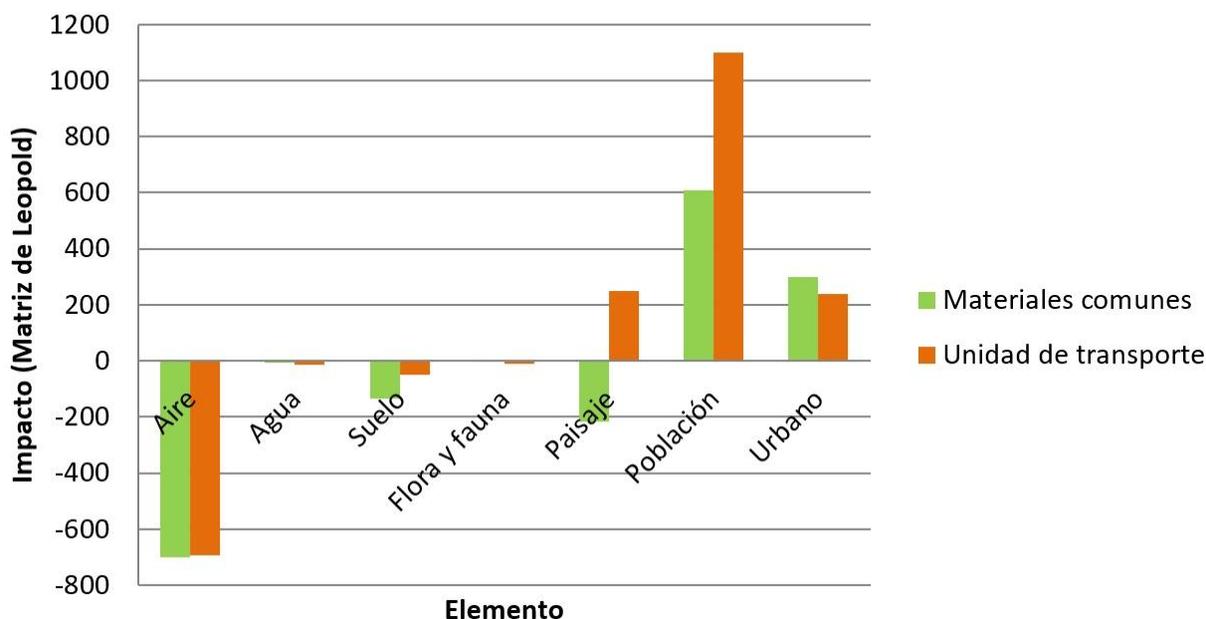


Figura 10. Comparación de impactos en los diversos elementos analizados en Matriz de Leopold por tipo de construcción

Fuente: Elaboración propia



Tabla 1. Resumen de resultados

Concepto	Información obtenida		
	<i>Alternativa 1: edificación tradicional</i>	<i>Alternativa 2: edificación Segundo uso</i>	<i>Dato deseable</i>
Superficie	32.43 m ²	32.50 m ²	NA
Ocupación total (usuarios)	12 lectores y 1 administrativo	12 lectores y 1 administrativo	10% sobre estudiantes inscritos y personal de tiempo completo y/o plaza de 3.00 m ² por usuario*
Área total de anaqueles	19.50 m ²	24.60 m ²	NA
Espacio para lectura colectiva	26.83%	24.92%	50.00%*
Lectura individual	0.00%	0.00%	30.00%*
Estudio en cubículo	0.00%	0.00%	10.00%*
Lectura informal	0.00%	4.00%	5.00%*
Equipos electrónicos	0.00%	0.00%	5.00%*
Acceso rampas	no	no	si*
Servicio sanitario	no	no	si*
Temperatura interior	S/D	S/D	20° a 24° zonas de trabajo, lectura y estantería abierta; de 16° a 18° para estantería cerrada**
Humedad relativa	S/D	S/D	45 a 50%**
Iluminación natural (factor de iluminación natural)	3.22%	3.19%	Factor de 3 a 5% deseable equivalente a 300 a 500 lux*
Sombreado	sin sombras en ningún mes	sombreado en los meses críticos	sombreado en meses críticos
Confort térmico interior			

Factor de decremento en muros	0.25	0.25	el factor menor posible
Factor de decremento en losa azotea	0.48	0.38	el factor menor posible
Impacto ambiental			
Componente Físico	-839.5	-755.10	menor impacto negativo***
Componente Biológico	-218.8	237.32	menor impacto negativo***
Componente socioeconómico	908.94	1 337.7	menor impacto negativo***
<i>Número de impactos negativos</i>	67	50	cantidad menor ***
<i>Número de impactos positivos</i>	104	68	cantidad menor ***
Ponderación total final	- 149.32	819.95	menor impacto negativo**

(*) Indica lineamientos de acuerdo con el Consejo Nacional para Asuntos Bibliotecarios de las Instituciones de Educación Superior A. C. [24]

(**) Indica de acuerdo con la metodología de Leopold [16]

S/D Indica sin datos

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

La propuesta de biblioteca desarrollada dentro de las estructuras de camiones descartados presentó algunas limitaciones: los resultados de la distribución dentro de una unidad no fueron suficientes de acuerdo con lo que la normativa señala para cubrir la demanda tanto de instalaciones como de área de lectura. Es necesario el uso de clima o aire acondicionado para lograr el estándar de calidad del aire para la manutención del acervo cultural que ahí se manejaría, así como del confort térmico para el usuario. Además de la falta de espacio para la ubicación de servicios sanitarios, se detecta la falta de rampas para el traslado de personas con discapacidad, así como las adecuaciones necesarias para el tránsito de personas en silla de ruedas. La mayoría



de estas limitaciones se presentaron porque se analizó la opción de adaptación de una sola unidad de transporte por biblioteca. La utilización de dos o más unidades en conjunto permitiría obtener espacios suficientes acorde a los requerimientos normativos, aunque esto implicaría obtener diferentes magnitudes en los impactos socioambientales.

En cuanto al análisis de impacto ambiental, se concluye que el desarrollo de la alternativa de reutilización es positivo en los tres componentes, físico, biológico y socioeconómico, en comparación con una alternativa similar desarrollada y analizada con especificación de materiales utilizados comúnmente en la zona. Comprobando así la utilidad del uso de herramientas de evaluación del impacto ambiental para decidir entre diferentes alternativas de proyectos antes de llevar a cabo la ejecución de dichos proyectos, ya sean arquitectónicos o de obras civiles.

El uso de la herramienta de matriz de Leopold fue de provecho, sin embargo, contiene un margen de error debido al uso subjetivo de escala de valor supeditadas al criterio del autor. La matriz señala el uso de indicadores cuya obtención fue difícil de localizar en la literatura y su aplicación a este trabajo.

Aun así, se observa en la evaluación del impacto ambiental que para la ejecución de ambas alternativas el factor ambiental con mayor alteración es el componente físico, ya que su afectación es proporcional al uso de materia prima según el caso. Otro aspecto detectado, es la diferencia de los impactos en el ambiente que resulta de las emisiones de la maquinaria que se necesita para la ejecución la alternativa correspondiente. Además, se reconoce que el consumo energético durante la operación de las bibliotecas, especialmente en lo referente a iluminación y ventilación, puede representar una fuente significativa de emisiones de CO₂, dependiendo del tipo de suministro eléctrico disponible.

Para los factores biológicos y socioeconómicos no se encontraron indicadores preestablecidos, por lo que se propuso una misma escala para la ponderación de ambas alternativas. En ambos factores los resultados fueron positivos, ya que el predio donde se almacenan los residuos cambiaría su uso y habría mejora en el entorno. Se evitaría vandalismo, quema de maleza y aumentaría la seguridad de la zona. El resultado final del factor socioeconómico también fue

positivo en la alternativa de reutilización, en respuesta a la demanda de empleo que detonaría la fabricación de la nueva edificación.

En este artículo adopta enfoque holístico alrededor del enfoque de economía circular. Teniendo como premisa mantener los materiales de las unidades de transporte público en uso el mayor tiempo posible, integra estrategias bioclimáticas de diseño para la adaptación de las unidades como bibliotecas, aporta información útil para los tomadores de decisiones al integrar la matriz de Leopold como herramienta de evaluación del impacto socioambiental y puede inspirar políticas públicas de reutilización creativa de infraestructura urbana al tener potencial de ser replicado.

Vínculo para ver detalle de figuras

https://posgradossustentabilidad.unison.mx/econ_circ_trans_pub

Declaración de Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- [1] N. Estupiñan *et al.*, “Ley De Transporte,” *Banco de desarrollo de América Latina*, vol. 1, p. 91, 2018.
- [2] M. De Matos and M. De Andrade, “Demand-side innovation policies and the planning of the public transportation system in the city of Curitiba (State of Paraná, Brazil),” *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 182, pp. 219–228, 2019, doi: 10.2495/UT180211.
- [3] E. M. Szumska, R. S. Jurecki, and M. Pawelczyk, “Life Cycle Cost (LCC) Level of an Urban Transport Fleet with Differentiated Share of Buses with Alternative Drive Systems,” *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*, vol. 22, no. 3, pp. 68–77, 2020, doi: 10.26552/com.c.2020.3.68-77.
- [4] L. Li, H. K. Lo, and X. Cen, “Optimal bus fleet management strategy for emissions reduction,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 41, pp. 330–347, 2015, doi: 10.1016/j.trd.2015.10.007.
- [5] US EPA - SEMARNAT, *Processing End-of-Life Vehicles: A Guide for Environmental Protection, Safety and Profit in the United States-Mexico Border Area*. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2017. Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/eol_vehicle_guide_final_english.pdf
- [6] R. Wasserbaur, T. Sakao, and L. Milios, “Interactions of governmental policies and business models for a circular economy: A systematic literature review,” *J Clean Prod*, vol. 337, no. December 2021, p. 130329, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130329.
- [7] H. Akram and T. E. Butt, “WET nexus between the three sectors – ‘waste to energy for transport,’” *J Clean Prod*, vol. 339, no. January, p. 130545, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130545.



- [8] A. De Almeida, R. Aparecida, B. Stolte, and R. De Castro, "Use of scrap tire rubber in place of SBS in modified asphalt as an environmentally correct alternative for Brazil," *J Clean Prod*, vol. 33, pp. 236–238, 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.03.039.
- [9] T. D. Bui, J. W. Tseng, M. L. Tseng, and M. K. Lim, "Opportunities and challenges for solid waste reuse and recycling in emerging economies: A hybrid analysis," *Resour Conserv Recycl*, vol. 177, no. October 2021, p. 105968, 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105968.
- [10] NAFIN-KfW-GIZ, *Guía Práctica Chatarrización para Tomadores de Decisión*. Ciudad de México: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2023.
- [11] C. Avilés and A. Rodríguez, "The sustainability of waste management models in circular economies," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 13, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3390/su13137105.
- [12] J. Mardaljevic and J. Christoffersen, "'Climate connectivity' in the daylight factor basis of building standards," *Build Environ*, vol. 113, no. January, pp. 200–209, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.08.009.
- [13] UNAM, UNISON, UAT, U de C, CENIDET, and UAM Azcapotzalco, "Ener-Habitat." Accessed: Sep. 10, 2024. [Online]. Available: <http://www.enerhabitat.unam.mx/Cie/introduccion.jsp>
- [14] Trimble Inc, "SketchUp." Accessed: Sep. 10, 2024. [Online]. Available: <https://help.sketchup.com/en/sketchup-viewer/getting-started-sketchup-desktop-viewer>
- [15] LAB EEE, "Analysis SOL-AR | Laboratório de Eficiência Energética em Edificações," LABORATORIO DE EFICIENCIA ENERGITCA EM EDIFICACOES. Accessed: Sep. 10, 2024. [Online]. Available: <https://labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-sol-ar>
- [16] B. Leopold, F. Clarke, B. Hanshaw, and J. Balsley, *A procedure for evaluating environmental impact*. Washington, D.C.: United States Department of the Interior, 1971. doi: 10.3133/cir645.
- [17] Gobierno de la República, "Catálogo de la Red Nacional de Bibliotecas Públicas," Dirección General de Bibliotecas. Accessed: Jun. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/cultura/acciones-y-programas/catalogo-de-la-red-nacional-de-bibliotecas-publicas>
- [18] Servicio Meteorológico Nacional, "Información Estadística Climatológica," Gobierno de México. Accessed: Oct. 19, 2023. [Online]. Available: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- [19] Instituto Nacional de Estadística y Geografía., "Cuéntame de México," INEGI. Accessed: Jun. 12, 2023. [Online]. Available: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/son/territorio/clima.aspx?tema=me&e=26>
- [20] OECD, "México: Avances en la transición hacia cero emisiones netas," 2021, *Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris*. Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.oecd.org/regional/RO2021-Mexico-ES.pdf>
- [21] Gobierno de México, *México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 1990-2019*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2022. Accessed: Oct. 08, 2024. [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/InventarioGEI_Mexico_1990_2019.pdf
- [22] Gobierno de México, *NORMA Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011, Construcción-Condiciónes de seguridad y salud en el trabajo*. Ciudad de México: Secretará del Trabajo y Previsión Social, 2011. Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/Nom-031.pdf>
- [23] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, "Ley general de archivos," *Ley General de Archivos*, no. 2 (266), p. 4, 2023.
- [24] Consejo Nacional para Asuntos Bibliotecarios de las Instituciones de Educación Superior A. C., *Normas para Bibliotecas de Instituciones de Educación Superior e Investigación*. 2012.

- [25] E. Neufert, *Arte de Proyectar en Arquitectura*, 16va, ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2009.
- [26] G. John R. and J. O. Lewis, *The Bioclimatic Architecture*, no. Dg Xvii. Dublin: LIOR E.E.I.G., 1997.
- [27] R. Celis, "Estudio de sistemas pasivos para la iluminación natural del aula taller del edificio Creas en Pozuelo de Alarcón," 2018.
- [28] Chaos Software, "V-Ray." Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.chaos.com/es/vray>
- [29] A. Garmendia, A. Salvador, C. Crespo, and L. Garmendia, *Evaluación de impacto ambiental*, Pearson-Pr. Madrid, España: Pearson Educación, S.A., 2005.

Cómo citar este artículo:

Esquer Peralta, J., Ayala Moreno, J. P., Ruiz Bustos, R., Guzmán Grijalva, H. M., & Munguía Vega, N. E. (2025). *Economía Circular en Gestión de Unidades de Transporte Público: Caso Sonora*. *EPISTEMUS*, 19(38). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v19i38.439>

