

Evaluación de estrategias para reducir la huella ecológica en edificaciones residenciales en clima tropical

Evaluation of Strategies to Reduce the Ecological Footprint in Residential Buildings in a Tropical Climate

Fernando Pineda-Sosa¹ , Maria Borggooff¹ , Nathalia Tejedor-Flores¹⁻⁴ , Dafni Mora^{1,3,4} , Miguel Chen-Austin^{1,3,4*} 

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Grupo de Investigación en Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas, Facultad de Ingeniería Mecánica, Panamá

² Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH), Panamá

³ Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología (CEMCIT-AIP), Panamá

⁴ Sistema Nacional de Investigación (SNI), Panamá

fernando.pineda@utp.ac.pa, maria.borggooff@utp.ac.pa, nathalia.tejedor@utp.ac.pa, dafni.mora@utp.ac.pa, miguel.chen@utp.ac.pa

Fecha de recepción: 19 de julio de 2022; Fecha de aprobación: 4 de noviembre de 2022.

*Autor de correspondencia: Miguel Chen-Austin (miguel.chen@utp.ac.pa)

RESUMEN. En esta investigación se evaluó la huella ecológica de una edificación residencial ubicada en la provincia de Herrera, Panamá, mediante su huella de carbono y huella hídrica. Este estudio se realizó con el objetivo de encontrar factores críticos en los cuales nuevas estrategias de bajo consumo se implementarían y disminuirían las huellas encontradas. Para realizar este trabajo, se utilizaron softwares de simulación como los son DesignBuilder y Revit para encontrar el desempeño energético e hídrico, correspondientemente, de la edificación. Los resultados mostraron que implementando estrategias como el uso de nuevos materiales de construcción y el uso de un sistema de aire acondicionado eficiente, se obtiene una disminución del 57.0% de la huella de carbono. Paralelamente, estrategias como la instalación de artefactos hídricos eficientes, técnicas de riego eficiente, utilización de agua lluvia y agua gris, disminuyen en un 53.8% la huella hídrica actual en la edificación. Finalmente se concluyó que factores como el nivel de aislamiento en los cerramientos de la edificación y la utilización del sistema de aire acondicionado son los causantes del alto nivel de huella de carbono en la edificación y son puntos críticos sobre los cuales las estrategias de reducción causan un mayor impacto. También se concluyó en que debido al gran potencial hídrico que posee Panamá, la utilización de agua lluvia y el uso de nuevas tecnologías en artefactos hídricos son las estrategias de bajo consumo que tiene un mayor impacto en la huella hídrica de las edificaciones.

Palabras clave. *Confort, edificación, huella de carbono, huella hídrica, Panamá.*

ABSTRACT. In this investigation, the ecological footprint of a residential building, located in the province of Herrera, Panama, was evaluated through its carbon footprint and water footprint. This research was carried out with the objective of finding critical factors in which new low-consumption strategies would be implemented and the footprints found would be reduced. To carry out this work, simulation softwares such as DesignBuilder and Revit were used to find the building's energy and water performance, correspondingly. Results showed that implementing strategies such as using new construction materials and using an efficient air conditioning system, creates a 57.0% decrease in the carbon footprint. At the same time, strategies such as installing efficient water devices, efficient irrigation techniques, use of rainwater and greywater create a 53.8% decrease in the current building's water footprint. Finally, it was concluded that factors such as the level of insulation in the building enclosures and the use of the air conditioning system are the cause of the high level of carbon footprint in the building and are critical points on which the evaluated strategies cause a greater impact. It was also concluded that due to Panama's great hydric potential, the use of rainwater and implementation of new technologies in water devices are the low consumption strategies that have the greatest impact on the water footprint of buildings.

Keywords. *Comfort, building, carbon footprint, water footprint, Panama.*

1. Introducción

Son múltiples los problemas que afectan la calidad del medio ambiente y consecuentemente la calidad de vida

de las personas en el mundo, entre los cuales predominan el cambio climático y la insostenibilidad de la tierra debido a las actividades humanas. En 2008, la huella ecológica de Panamá alcanzó la biocapacidad de la tierra, lo que generó una translimitación ecológica, es decir, la demanda anual de recursos naturales por parte de los habitantes en el país superó lo que la tierra puede generar en un año. Esta tendencia continuó en los siguientes años y desde 2014, Panamá está catalogado como un país ecológicamente insostenible según el Fondo Mundial para la Naturaleza. Para poder disminuir la tasa de crecimiento de la huella ecológica en Panamá, se creó la necesidad de disminuir todos aquellos indicadores individuales de los cuales este se compone, como lo es la huella de carbono y la huella hídrica principalmente [1], [2], [3].

Desde que los especialistas en el tema propusieron y establecieron los términos de huella de carbono y huella hídrica, se han convertido en los dos indicadores medioambientales más utilizados en los últimos años por naciones y organizaciones para medir el estado actual del impacto que un producto o servicio representa para el medio ambiente [4], [5]. La huella de carbono proporciona un control de las emisiones totales en [kg] de CO₂ como emanaciones directas o residuales de las actividades a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio [6], [7]. Paralelamente, la huella hídrica indica la cantidad de agua que requiere todo el proceso para la obtención de un producto o realización de un producto [8], [9]. El cálculo en conjunto de ambas huellas compone de forma práctica, casi en su totalidad, el cálculo de la huella ecológica. Consecuentemente, una disminución en estas huellas individuales se refleja en la disminución de la huella ecológica general.

Una de las áreas industriales que más impacto tiene en el medio ambiente es el área de la construcción, la cual ha tomado auge en los últimos años debido al incremento demográfico en Panamá. Esta situación se ve reflejada en la construcción masiva de edificaciones residenciales y comerciales, siendo estas, los dos tipos de edificaciones más grandes en cuanto a emisión de gases de efecto invernadero y consumo hídrico [10]. Con un alza poblacional aproximada de un 13% en los últimos 10 años, el sector de la construcción residencial ha incrementado de forma elevada en las áreas del país

donde se concentran la mayor cantidad de personas [3], [11].

Dentro de los diversos estudios realizados en Panamá con respecto al impacto ambiental que conlleva la construcción y operación de estas edificaciones, son muy pocos los que priorizan la huella de carbono como factor ambiental fundamental. Fue en noviembre del 2016 cuando se establece por primera vez la resolución No. 3142 de la Secretaría Nacional de Energía (SNE) que buscaba el ahorro de energía por medio de una guía en cuanto al diseño y construcción eficiente de nuevas edificaciones [12]. Esta resolución se aplicó como propuesta para implementación en diferentes tipos de edificaciones como hoteles, oficinas, centros comerciales, escuelas, viviendas, entre otras. En el año 2018 y 2019 surgen las últimas dos actualizaciones de la resolución No. 3142, las cuales fueron la resolución No. 3980 y la resolución No. JTIA 035, correspondientemente [13]. En esta última, se propone y se aprueba el Reglamento de Edificaciones Sostenibles (RES) por parte de la Junta Técnica de Ingeniería y Arquitectura (JTIA) y el Ministerio de Obras Públicas de Panamá. El RES nace con el objetivo de establecer los requisitos mínimos implementados en edificaciones de alto desempeño al mismo tiempo que garantiza ahorro de energía creando así, un menor impacto al medio ambiente. Este reglamento se planeó como una guía para diseñar y construir edificaciones nuevas de todo tipo, entre las que se establecieron excepciones como fábricas, plantas de generación, subestaciones eléctricas, plantas de bombeo y similares ya que estas cuentan con su propia legislación. El RES mantiene la expectativa y la meta en ahorro de un quince por ciento (15%) en la energía consumida en los primeros 2 años de aplicación y un veinte por ciento (20%) en los años siguientes. Todo esto mediante el uso de nuevos sistemas eficientes en la construcción que logren alcanzar las metas establecidas [14].

Si se habla del impacto negativo al medio ambiente, no se puede negar que la escasez y mal aprovechamiento del agua es, a nivel mundial, uno de los factores más influyentes [15]. El agua es uno de los recursos más importantes en el ámbito de las edificaciones, especialmente en las etapas de construcción y operación. La utilización masiva de cemento, acero y otros materiales, en conjunto con la cadena de actividades

diarias que requieren este recurso hídrico, aumentan de forma significativa la huella hídrica de las edificaciones, especialmente en las edificaciones robustas dedicadas a viviendas multifamiliares o edificaciones comerciales [16], [17]. En Panamá, son escasos los estudios en el ámbito de la construcción que contemplan la huella hídrica a pesar de la evidente problemática que el país enfrenta con respecto a este recurso. El manejo de agua en el país se ve afectado por el incremento demográfico y la construcción masiva de edificaciones residenciales en los últimos años, esto debido a que la expansión de las ciudades ha disminuido la cobertura boscosa, no permitiendo la infiltración de agua en el suelo, modificando los cauces naturales de agua y el paisaje natural. Este y otros factores como lo son la precariedad del sistema de distribución hídrico y el mal uso del recurso a nivel nacional, impiden el desarrollo del potencial hídrico que Panamá posee naturalmente [18].

Los pocos estudios que utilizan la huella hídrica como directriz medioambiental en el país se centran en áreas como alimentación y ganadería ya que el uso directo del agua es más evidente. De igual forma, el tema de seguridad hídrica ha desviado la atención de las entidades a los procesos de tránsito de embarcaciones llevadas a cabo en el Canal de Panamá [19], [20], [21]. Estas actividades le restan importancia al verdadero rol que toma el recurso hídrico en actividades de construcción.

Es por esta razón que surge la necesidad de implementar nuevas metodologías de cálculo que muestren el nivel de estos indicadores medioambientales en todas las áreas que representen un impacto al medio ambiente, principalmente en el sector de la construcción. Se busca implementar estas metodologías en el ciclo de vida de una edificación y así lograr visualizar los puntos y factores potenciales en los cuales, la huella de carbono y la huella hídrica se puedan reducir. De esta forma, se crea una serie de estrategias establecidas como guía para el diseño y construcción de edificaciones residenciales futuras en Panamá y así, hacer frente y contrarrestar la tendencia de incremento que la huella ecológica posee actualmente. Esto con la finalidad de crear una base sólida y fiable donde las nuevas construcciones a nivel nacional puedan ser certificadas internacionalmente como edificaciones a cero emisiones y cero consumo de agua.

2. Materiales y métodos

Para la realización de este trabajo de investigación, se seleccionó una edificación residencial unifamiliar ya construida en la provincia de Herrera, ciudad de Chitré, Panamá. Esta edificación fue denominada caso de estudio y fue utilizada como modelo sobre la cual, se realizó el análisis energético e hídrico.

Como primer paso, se hizo una evaluación detallada de las características de la edificación, tomando en cuenta:

- Dimensiones generales
- División de espacios y usos de habitaciones
- Materiales de construcción
- Horario promedio de permanencia de los usuarios por habitación
- Inventario de equipos eléctricos por habitación
- Inventario de artefactos sanitarios por habitación

De igual forma, se obtuvieron los datos meteorológicos de la zona de estudio proporcionados por la plataforma Solargis y la empresa de transmisión eléctrica panameña (ETESA) [22]. Dentro de los resultados meteorológicos obtenidos, se utilizaron fundamentalmente los datos de temperatura promedio mensual y el nivel de precipitación histórico mensual en la zona de estudio como se muestran en la Figura 1 y Figura 2 correspondientemente.

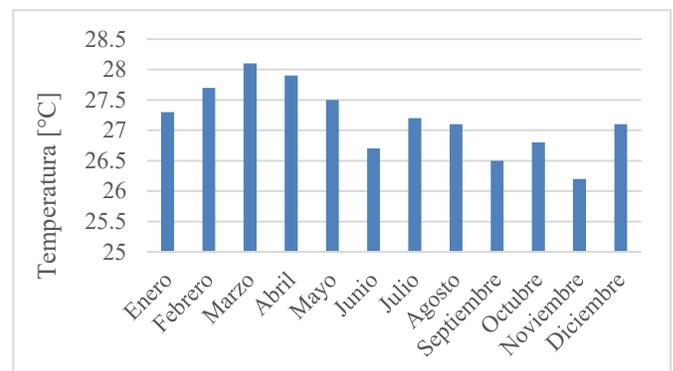


Figura 1. Temperatura histórica promedio mensual en la zona de estudio.

Fuente: Datos obtenidos por plataforma Solargis.

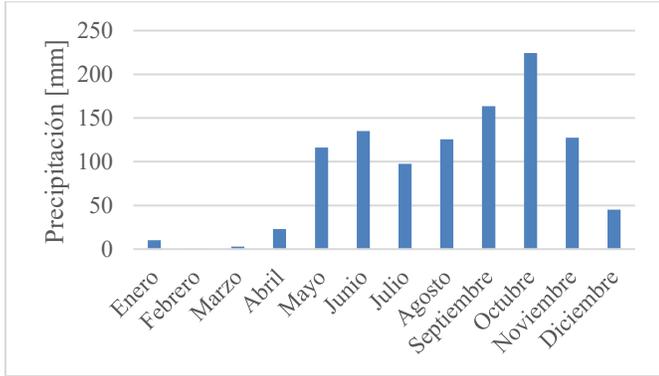


Figura 2. Nivel de precipitación histórico mensual en la zona de estudio.
Fuente: Datos obtenidos por ETESA.

Posterior a la evaluación de todas las características de la edificación tomada como caso de estudio, se utilizaron estos datos para crear un modelo tridimensional virtual de la vivienda con la ayuda de distintos softwares de modelado BIM para simular el desempeño energético e hídrico de la construcción. La réplica del comportamiento energético e hídrico de la edificación daría las pautas para ubicar los puntos y factores donde nuevas estrategias se implementarían y crearían un mayor impacto en la reducción de la huella de carbono y huella hídrica.

2.1 Huella de Carbono

Para la evaluación de la huella de carbono, todos los datos previamente obtenidos fueron ingresados al software de modelado DesignBuilder v6.1.6.011. En este software se construyó el modelo tridimensional de la estructura, el cual fue sometido a una serie de simulaciones dinámicas para obtener los datos del desempeño energético de la edificación. Entre los datos obtenidos destacaron principalmente:

- Consumo eléctrico mensual
- Generación de emisiones mensuales de CO₂
- Horas mensuales de no confort dentro de la edificación

Para garantizar la fiabilidad de estos datos, se realizó un proceso de validación en el cual se compararon los valores del consumo eléctrico obtenidos por simulación y los valores reales en las facturas de energía eléctrica correspondientes al mismo periodo del año. Para esto, se utilizaron los criterios de validación del error de sesgo medio normalizado (NMBE) y el coeficiente de variación

de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) propuestos en la ASHRAE 14 [23].

Posterior a la validación de los datos reflejados por el modelo tridimensional en la simulación, los datos obtenidos (consumo eléctrico, emisiones de CO₂, horas de no confort) fueron establecidos como la línea base la cual las nuevas estrategias se implementarían y se compararían sus mejoras. El total de emisiones en [kg] de CO₂ se tomó como la huella de carbono de la actual vivienda.

Seguidamente, con la ayuda del motor de análisis energético de DesignBuilder se realizó un proceso de optimización del modelo tridimensional. En este paso, el software, mediante sus librerías de datos, se identificó todas los factores disponibles y reemplazables para cada una de las variables de diseño (materiales de construcción, horarios de estancia en las habitaciones, sistemas de aire acondicionado, entre otros). Esto con el objetivo de crear procesos de simulación iterativos combinando las opciones de variables de diseño y seleccionando las soluciones (combinaciones) óptimas las cuales se reflejarían en mejores resultados en las variables de interés (consumo eléctrico, emisiones de CO₂, horas de no confort).

Los mejores resultados, identificados como óptimos, fueron seleccionados como combinaciones de diseño encontradas dentro de los rangos de confort térmico establecidos por el estándar ASHRAE 55 dirigido a espacios acondicionados naturalmente [24], [25]. Este estándar fue el criterio de confort utilizado por el software para garantizar la comodidad de los usuarios al implementar las mejoras propuestas. Mediante los resultados del proceso de optimización, se identificaron los cambios adecuados a realizar en la vivienda que disminuirían el consumo eléctrico, las emisiones de CO₂ y consecuentemente la huella de carbono.

Ya que el proceso de optimización entregó una pauta del comportamiento combinado de las variables de diseño, se realizó posteriormente un análisis paramétrico de las variables de diseño. El proceso de optimización proporcionó las mejoras óptimas potenciales para la vivienda y el análisis paramétrico entregó las pautas para justificar el cambio de cada variable. Este último para poder visualizar el comportamiento de las variables de interés con respecto al cambio individual.

2.2 Huella hídrica

Para la evaluación de la huella hídrica, los datos referentes a las características de la vivienda fueron ingresados en el software de modelado Revit de Autodesk. Se creó el modelo tridimensional de la edificación y se sometió a una simulación dinámica para replicar su desempeño hídrico. La capacidad del software Revit, al ser compatible con el motor de análisis energético Green Building Studio, logró proporcionar los datos concernientes a los diferentes flujos y finalidades en el uso del agua en la vivienda. Mediante la simulación dinámica, se pudo obtener el consumo de agua de la edificación. Este resultado fue validado mediante la comparación del consumo de agua reflejado en las facturas del servicio correspondientes.

Luego de verificar el estado de los resultados de la simulación dentro del rango aceptable de error, el consumo de agua entregado por el software fue establecido como la línea base sobre la cual se implementarían las estrategias de bajo consumo y se compararían sus mejoras. El volumen de agua registrado por el software se tomó como la huella hídrica de la edificación.

Posterior al planteamiento y validación de la línea base, se utilizó el software Revit, con la ayuda de Green Building Studio para realizar un estudio de estrategias de bajo consumo. Este estudio tuvo como objetivo, observar el ahorro en volumen de agua mediante la implementación de diferentes técnicas de bajo consumo en las actividades diarias. Las estrategias planteadas fueron:

- Utilización de artefactos sanitarios eficientes
- Recolección y utilización de agua lluvia
- Reutilización de agua gris
- Técnicas eficientes de jardinería

La primera de las estrategias propone la implementación de tecnologías de bajo caudal o caudal controlado para disminuir el consumo y garantizar la realización de las actividades sin interferir en la comodidad de los usuarios [26], [27]. La segunda plantea la utilización de agua lluvia mediante un sistema de captación, almacenamiento, filtrado y distribución para actividades que no sean destinadas a consumo humano [28], [29]. La tercera estrategia presenta la opción de reutilizar el agua ya utilizada previamente en otras actividades para suplir con agua destinada a actividades que no sean para consumo humano. Esto con el objetivo

de darle un segundo uso y aprovechar al máximo el recurso. Como última estrategia se presentan diferentes técnicas de riego eficiente, para ahorrar la mayor cantidad de agua dirigida a jardinería [30], [31].

El estudio de estrategias de bajo consumo se llevó a cabo para observar la variación del consumo total de agua en la edificación y de esa forma, disminuir la dependencia del agua proveniente de la red pública.

3. Resultados y discusión

3.1 Resultados y discusión del análisis de huella de carbono

Por medio de la simulación dinámica realizada al modelo tridimensional de la edificación, se obtuvieron los resultados referentes al desempeño energético. Entre los resultados más relevantes, se presenta en la Tabla 1 el comportamiento mensual de las variables de interés (consumo eléctrico total, emisiones de CO₂ y horas de no confort) a lo largo de un año en la edificación. De igual forma, la Figura 3 muestra el desglose mensual del consumo eléctrico por parte de los diferentes sistemas utilizados en la vivienda.

Tabla 1. Resultado mensual del comportamiento en consumo eléctrico total, emisiones de CO₂ y horas de no confort en la edificación.

Mes	Consumo eléctrico total [kWh]	Emisiones de CO ₂ [kg]	Horas de no confort [h]
Enero	684.0	414.6	51.8
Febrero	620.0	375.9	45.8
Marzo	691.0	418.9	53.3
Abril	663.0	402.0	50.9
Mayo	675.0	409.0	52.2
Junio	630.0	381.5	47.0
Julio	671.0	406.3	51.8
Agosto	663.0	402.0	50.3
Septiembre	639.0	387.3	47.9
Octubre	669.0	405.4	51.6
Noviembre	637.0	385.8	48.5
Diciembre	687.0	416.6	52.4
Total	7,929.0	4,805.3	603.5

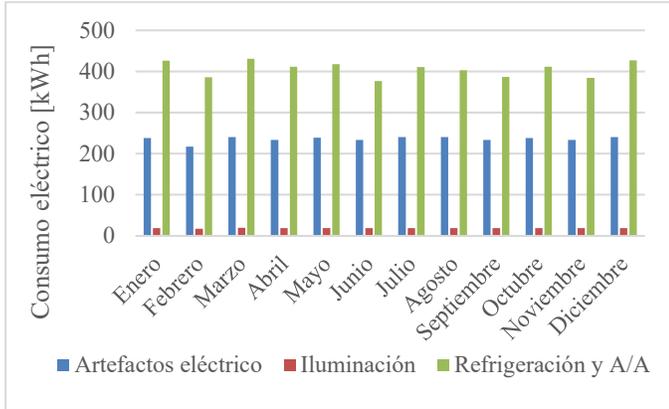


Figura 3. División mensual del consumo eléctrico de la edificación por sistema.

El error de sesgo medio normalizado (NMBE) y el coeficiente de variación de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) mostraron un porcentaje de error del 6.30% y 14.4% correspondientemente en comparación a los datos reales de la edificación. Estos valores fueron encontrados como aceptables y de esa forma, los datos mostrados en la Tabla 1, fueron seleccionados como la línea base del caso de estudio sobre la cual se implementarías las estrategias de bajo consumo referentes al desempeño energético y se compararían sus mejoras.

Luego de establecer la línea base, se realizó el proceso de optimización del modelo constructivo en el software (DesignBuilder). La Tabla 2 muestra los resultados totales anuales de las mejores tres combinaciones entre todas las posibles variables de diseño que cumplían con los criterios óptimos establecidos por el software dentro de los rangos aceptables de confort.

Tabla 2. Resultados anuales de las soluciones óptimas encontradas en el proceso de optimización.

Opción	Consumo eléctrico total [kWh]	Consumo eléctrico (A/A) [kWh]	Emisiones de CO ₂ [kg]	Horas de no confort [h]
1	3,390.0	2,638.2	2,054.3	79.1
2	4,121.4	3,384.4	2,497.6	76.9
3	3,725.2	2,973.4	2,257.4	76.7

Por medio de estos resultados, se observa que la solución número uno, es la que presenta un menor consumo eléctrico y una menor generación de emisiones. Por esta razón, esta se establece como la mejor combinación encontrada por el software. Las

modificaciones propuestas por el software para obtener dichos resultados son las siguientes:

- Instalación de capas de aislamiento en las paredes externas en la edificación con el objetivo de disminuir la ganancia térmica a través de las paredes
- Instalación de capas de aislamiento en el techo de la edificación con el objetivo de disminuir la ganancia térmica a través del techo
- Sustitución del material de particiones por bloques de hormigón y yeso
- Instalación de un acristalamiento sencillo color bronce de 6 mm de espesor en las ventanas
- Utilización del sistema de aire acondicionado solo en horario diurno

Posteriormente, los resultados más relevantes del análisis paramétrico, obtenidos por el software, se muestran en la Figura 4, Figura 5 y Figura 6 (Ver tipos de paredes y techos en Tabla 4 y Tabla 5 respectivamente, sección de Anexos).

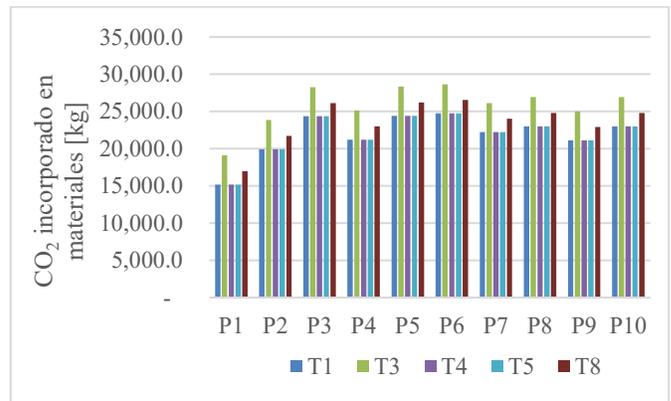


Figura 4. Generación de emisiones de CO₂ por material de pared y techo.

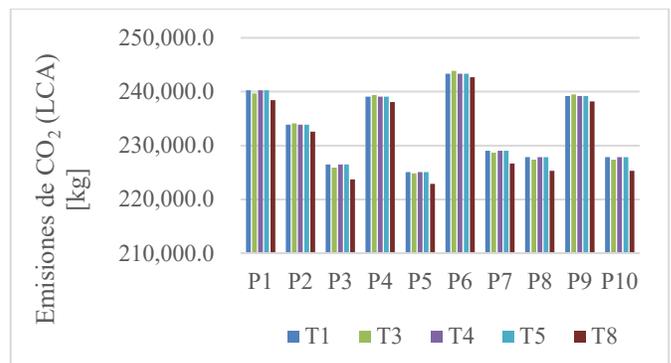


Figura 5. Generación de emisiones de CO₂ con enfoque de ciclo de vida por material de pared y techo.

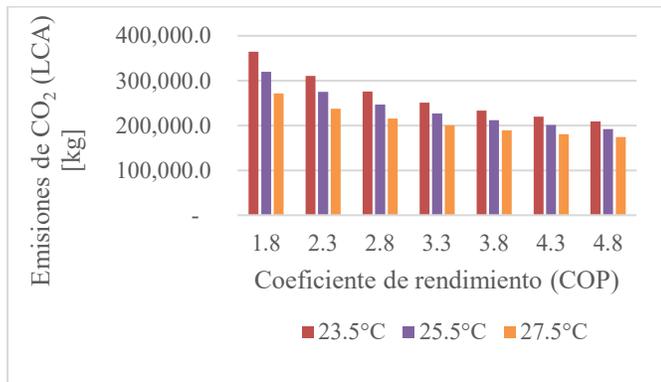


Figura 6. Generación de emisiones de CO₂ con enfoque de ciclo de vida con respecto al coeficiente de rendimiento y temperatura de operación del sistema de aire acondicionado.

Por medio de los resultados obtenidos del análisis energético reflejados en la Figura 3, se puede observar que el mayor consumo eléctrico recae en el sistema de aire acondicionado y refrigeración de la edificación con un valor de 4,872.7 kWh al año. Los datos registrados en la Figura 1, referentes a las temperaturas promedio en la zona de estudio, son valores fuera del rango de temperatura considerado como “rango de confort” según los rangos establecidos por los criterios ASHRAE 55. Es por esta razón que surge el nivel elevado en las horas de no confort en la vivienda, como se demuestra en la Tabla 1 y justifica el uso excesivo del sistema de acondicionamiento de aire en la edificación. El sistema de acondicionamiento de aire y refrigeración, refleja ser el sistema con el potencial de ahorro eléctrico más grande en comparación a los otros sistemas. Por medio de los cambios descritos, se prioriza la utilización del aire acondicionado en horarios que presentan temperaturas más elevadas en el día y se gestiona de mejor forma la transferencia de calor para mantener temperaturas agradables dentro de la vivienda a lo largo del día gracias a la utilización de aislamiento en los cerramientos.

De igual forma, la Tabla 1 muestra la generación de emisiones en kg de CO₂ anual total, equivalente a 4,805.3kg. Tomando este dato y el área del suelo de la edificación como 99.4m², extraído de las características generales de la vivienda, se establece la huella de carbono actual generada con un valor de 48.3kg de CO₂/ año*m².

La opción número uno de la Tabla 2, seleccionada como mejor solución, muestra un leve incremento en las

horas de no confort en la edificación en comparación a las otras soluciones, sin embargo, este incremento no se considera significativo a una escala anual en comparación a los beneficios obtenidos por medio de las otras variables de interés.

Referente al consumo eléctrico de la edificación, este disminuye en un 28.0% por el sistema de acondicionamiento de aire y un 57.0% en su consumo total. Esto implementando las mejoras propuestas por el software (DesignBuilder) en el proceso de optimización, como se muestra en la Figura 7.

Consumo eléctrico

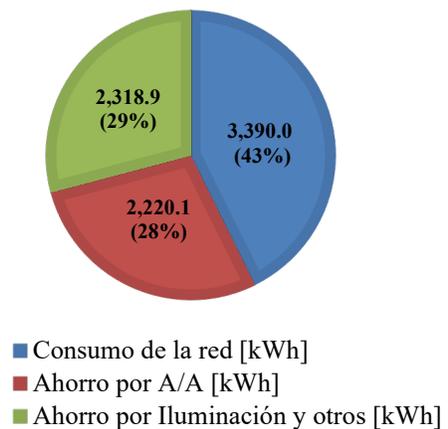


Figura 7. Ahorros en consumo eléctrico por proceso de optimización.

Referente a las emisiones de CO₂, por medio de la implementación de las mejoras, se logra disminuir en un 57.0% la generación de emisiones en la fase de operación del ciclo de vida de la edificación, como se muestra en la Figura 8. Este decrecimiento representa un cambio en el valor de la huella de carbono, la cual disminuye a un valor de 20.8kg de CO₂/año*m².

Emisiones de CO2

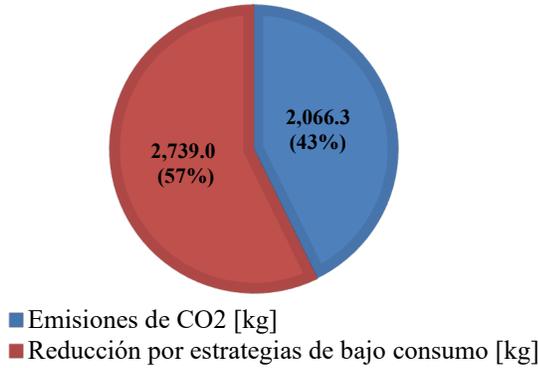


Figura 8. Disminución en emisiones de CO₂ por proceso de optimización.

Dados los datos obtenidos del análisis paramétrico, se puede observar en la Figura 4 que, en la etapa de construcción, los materiales con capas de aislamiento muestran un mayor nivel en la generación de emisiones de CO₂. No obstante, en la Figura 5 se demostró que, con un enfoque de ciclo de vida, tomando en cuenta la fase de operación de la edificación, la utilización de aislamiento mejora el desempeño del aire acondicionado de la vivienda. Las ventajas en una mejor gestión de transferencia de calor en la etapa de operación de una edificación son mayores a las desventajas que el uso de aislamiento genera. La reducción de las emisiones gracias a una menor dependencia del uso del sistema de aire acondicionado prevalece ante la generación de emisiones que genera la utilización de aislamiento.

Otra de las características a destacar del análisis paramétrico, es el aumento en las emisiones a una menor temperatura de operación del sistema de aire acondicionado. Este aumento en las emisiones se logra controlar a medida aumenta el coeficiente de rendimiento (COP) del sistema. A un mayor COP, el sistema de acondicionamiento de aire gestiona de mejor forma el trabajo realizado con respecto al consumo eléctrico necesario, de forma que realiza el mismo trabajo con un menor consumo eléctrico y consecuentemente, una menor generación en emisiones de CO₂, así como se observa en la Figura 6.

3.2 Resultado y discusión del estudio de la huella hídrica

Por medio del proceso de simulación dinámica realizado al modelo constructivo de la edificación en el software Revit, se obtuvo un consumo total anual de agua equivalente a 416.2m³. De este valor, un 91.2% del agua se dirige a actividades internas a la edificación y el 8.8% a actividades externas, como actividades de jardinería. Estos porcentajes equivalen a 379.7m³ y 36.5m³ de agua correspondientemente.

Para poder garantizar la veracidad de los resultados obtenidos por el software en cuanto al consumo hídrico actual en la edificación, se realizó un proceso de validación correspondiente. El proceso de validación mostró un porcentaje de error equivalente a 3.5% con respecto al valor del consumo total de agua real en la edificación proporcionado por las facturas de agua. Por esta razón, este valor fue encontrado como aceptable. Luego de establecer la línea base del caso de estudio, se realizó un estudio de estrategias de bajo consumo obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Volumen y porcentaje de ahorro hídrico por implementación de estrategias de bajo consumo en línea base.

Estrategia de bajo consumo	Porcentaje de ahorro en línea base	Volumen de agua ahorrado [m ³ /año]
Tecnologías de bajo consumo	18.6%	77.5
Utilización de agua lluvia	26.2%	108.9
Estrategias de riego eficientes	1.0%	4.1
Reutilización de agua gris	2.2%	9.1

Referente al consumo hídrico, el volumen de agua anual total utilizado en la edificación es de 416.2 m³. Tomando el área del suelo interno y externo de la edificación como 99.4m² y 126.3m² respectivamente, formando un área de suelo total de 225.7m², se establece la huella hídrica actual en la edificación equivalente a 1.8m³/m²*año.

Cabe recalcar que los niveles de precipitación presentados mensualmente en la Figura 2, como parte de las condiciones meteorológicas de la zona de estudio, muestran valores mayores a 24mm de agua al mes como nivel necesario para suplir con las actividades de jardinería. Por esta razón, las condiciones meteorológicas favorables en la zona de estudio logran disminuir el consumo de agua externa de la edificación de 36.5m³/año a un valor de 12.2m³/año.

Por medio de la implementación de las estrategias de bajo consumo, se asigna un porcentaje de ahorro de agua a las diferentes actividades externas e internas de la edificación, con el objetivo de suplir con el mayor porcentaje posible. La Tabla 3 muestra la asignación de porcentajes de ahorro de agua por sección de la edificación. La aplicación de las estrategias propuestas por el software Green Building Studio en la edificación, logra disminuir la huella hídrica de un 53.8% el valor de la huella hídrica actual, reflejado en un valor final de $0.9\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{año}$.

Consumo de agua externo

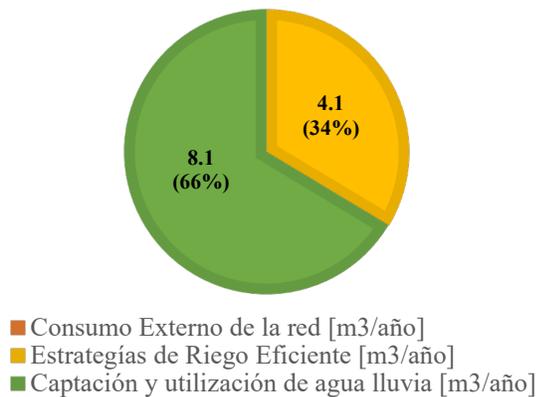


Figura 9. Ahorro potencial en consumo de agua externa a la edificación.

Consumo de agua interno

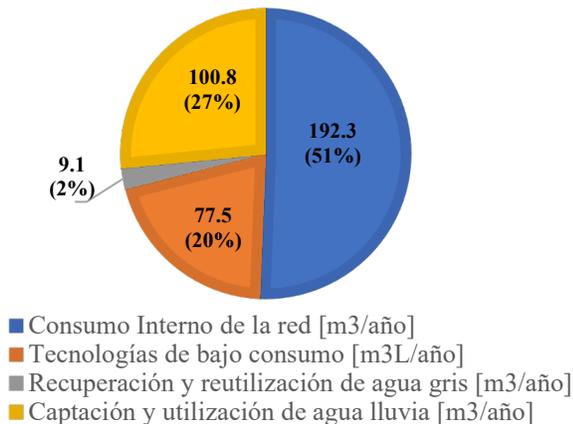


Figura 10. Ahorro potencial en consumo de agua interno a la edificación.

4. Conclusiones

Por medio de los datos obtenidos del proceso de optimización energético y de la implementación de estrategias de bajo consumo hídrico, se puede concluir que las modificaciones propuestas para la edificación logran disminuir un 57.0% su huella de carbono y un 53.8% su huella hídrica, garantizando el potencial que tendría esta edificación para optar por una certificación medioambientales internacionales que buscan una reducción de por lo menos un 40% a un 50% en las huellas correspondientes. La implementación de las estrategias propuestas posee las ventajas de ser modificaciones comprobadas anteriormente por otros estudios y se caracterizan por ser inversiones recuperables por los ahorros significativos de consumo eléctrico y consumo de agua.

De igual forma, se concluye que todos los cambios que este estudio propone no interfieren con las actividades cotidianas de los usuarios y la comodidad de estos ya que se garantiza el mejoramiento del confort dentro de la edificación que sirve como incentivo y crea una aceptación positiva de estas mejoras. Dentro de las limitaciones se encuentra la variabilidad de las características de cada vivienda, el proceso debe realizarse para cada tipo de vivienda ya que cuentan con dimensiones, materiales de construcción y datos meteorológicos distintos, por lo que los resultados no pueden generalizarse para todas las edificaciones residenciales unifamiliares, especialmente en distintos países. No obstante, dadas las condiciones meteorológicas relativamente constantes dentro del territorio nacional, con la excepción de ciertas zonas, se pueden tomar como base o como guía los resultados obtenidos en este estudio para crear una proyección a futura de las mejoras que se podrían obtener mediante la implementación de estas estrategias a todas las edificaciones residenciales del mismo tipo.

Como parte del mejoramiento constante de este tipo de estudios, se recomienda incluir la utilización de fuentes de energía renovable, con el objetivo de disminuir aún más el consumo eléctrico de la red pública y consecuentemente la huella de carbono. De igual forma se recomienda instalar equipos de filtrado y limpieza profunda fiables en los sistemas de utilización de agua lluvia y reutilización de agua gris, esto para garantizar un reciclaje de agua responsable y ampliar las actividades donde este tipo de agua pueda utilizarse siempre que sea

aceptado por el usuario. Finalmente se recomienda crear un análisis de costos de las estrategias descritas, ya que a pesar de que esta sea una inversión recuperable, el tiempo de recuperación de esta inversión puede ser clave para la aceptación de los usuarios. Se recomienda implementar estas estrategias y técnicas desde las etapas de diseño para obtener reducir costos posteriores (Etapa de operación) y así obtener todo el potencial que estos cambios ofrecen.

La ejecución de estas mejoras de forma progresiva en las edificaciones actuales y las edificaciones futuras en el país, ayudan a Panamá como país signatario de tratados y compromisos internacionales en búsqueda de nuevas estrategias de desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento al grupo de investigación en Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas (ECEB, <https://eceb.utp.ac.pa/>) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Panamá. Igualmente, al Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH, <https://cihh.utp.ac.pa/>). Esta investigación fue financiada por la Institución Panameña Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) <https://www.senacyt.gob.pa/> bajo el proyecto con código FID18-056 y el Sistema Nacional de Investigación (SNI).

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

FP y MB búsqueda de bibliografía, redacción del documento, metodología, análisis de datos. MC y DM, conceptualización, licencias necesarias de los softwares utilizados, bibliografía fundamental del documento y financiación por parte de las entidades correspondientes. NT proporcionó bibliografías y datos fundamentales con respecto a la huella hídrica y revisión completa del documento.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] M. Concepción, “La Problemática Ambiental de Panamá,” 2014, [Online]. Available: [https://cursa.ihmc.us/rid=1NLR8JMGJ-GHW2Y6-21KY/LA_PROBLEMATICA_AMBIENTAL_\(1\).pdf](https://cursa.ihmc.us/rid=1NLR8JMGJ-GHW2Y6-21KY/LA_PROBLEMATICA_AMBIENTAL_(1).pdf).
- [2] WWF, “Informe Planeta Vivo 2014,” p. 130, 2014, [Online]. Available: https://wwf.es/assets/panda.org/downloads/ipv_resumen_2014_1.pdf.
- [3] Mi Ambiente, “Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático Panamá,” *Mi Ambient. Panama*, p. 232, 2018.
- [4] M. Wackernagel, “Ecological Footprint and Appropriated Carrying Capacity - A Tool For Planning Toward Sustainability,” vol. 1988, no. Capítulo 1, pp. 1–9, 1994.
- [5] M. W. Bulege, “Biocapacidad y huella ecológica en el contexto del cambio climático de la ciudad de huancayo,” *Univ. Nac. del Cent. Perú*, 2016.
- [6] D. Pandey, M. Agrawal, and J. S. Pandey, “Carbon footprint: Current methods of estimation,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 178, no. 1–4, pp. 135–160, 2011, doi: 10.1007/s10661-010-1678-y.
- [7] S. Solano-Quesada and E. Ortiz-Malavassi, “Metodología de medición de la huella de carbono para edificaciones en Costa Rica y su aplicación en el módulo habitacional Trópika,” *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 29, no. 3, p. 73, 2016, doi: 10.18845/tm.v29i3.2889.
- [8] A. Y. Hoekstra, “Virtual Water Trade,” *Curr. Sci.*, vol. 94, no. 3, p. 293, 2008, doi: 10.4337/9781785369131.00016.
- [9] WFN, “Manual para la evaluación de huella hídrica,” p. 44, 2002, [Online]. Available: <http://waterfootprint.org/media/downloads/ManualEvaluacionHH.pdf>.
- [10] A. E. Fenner *et al.*, “The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 94, no. December 2017, pp. 1142–1152, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.012.
- [11] M. B. Rios, “Hacia donde va el sector inmobiliario en Panamá - COVID19,” *Univ. Politécnica Catalunya*, 2021.
- [12] G. Oficial, “Resolución No. 3142 - SNE,” no. 28165, pp. 1–57, 2016, [Online]. Available: <http://www.energia.gob.pa/energia/wp-content/uploads/sites/2/2017/02/Resoluci%25C3%25B3n-N.%25C2%25B03142-de-17-de-noviembre-de-2017GO28165.pdf>.
- [13] G. Oficial, “Resolución No. 3980 - SNE,” vol. 3980, no. 28634, pp. 1–44, 2018.
- [14] JTIA, “Reglamento de edificaciones Sostenibles (RES),” vol. 148, no. 28437, p. 6, 2019, [Online]. Available: https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/28090_A/GacetaNo_28090a_20160805.pdf.
- [15] M. Falkenmark and G. Lindh, “Water For a Starving World,” 2019.

- <https://books.google.com/sv/books?hl=es&lr=&id=05SwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT13&dq=water+problems+in+the+world&ots=pEuvAgsTRG&sig=KHSANYE2koeJpziD4IR167Pq-Dc#v=onepage&q&f=false> (accessed Jan. 19, 2021).
- [16] Y. Chang, Z. Huang, R. J. Ries, and E. Masanet, “The embodied air pollutant emissions and water footprints of buildings in China: A quantification using disaggregated input-output life cycle inventory model,” *J. Clean. Prod.*, vol. 113, pp. 274–284, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.014.
- [17] P. W. Gerbens-Leenes, A. Y. Hoekstra, and R. Bosman, “The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass,” *Water Resour. Ind.*, vol. 19, no. April 2017, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1016/j.wri.2017.11.002.
- [18] T. Díaz, “LA HUELLA HÍDRICA INDICADOR PARA APLICAR LA CIRCULARIDAD DEL AGUA: MODELO DE GESTIÓN SOSTENIBLE PARA PANAMÁ,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2020, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [19] GWP Panamá, “Foro Regional Gestión de los recursos hídricos y seguridad alimentaria,” 2015.
- [20] J. L. Robles Batista, “La Huella hídrica geográfica en el tránsito del Canal de Panamá, año 2002 al 2017.,” *Investig. y Pensam. Crítico*, vol. 6, no. 3, pp. 22–35, 2018, doi: 10.37387/ipc.v6i3.92.
- [21] M. Palacio, “Cuantificación de la huella hídrica en la producción bananera: Un estudio de caso en Bocas del Toro, Panamá,” vol. 4, no. 3, pp. 1–21, 2019, [Online]. Available: https://media.neliti.com/media/publications/112355-ID-pengaruh-struktur-aktiva-ukuran-perusaha.pdf?%0ACholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Funcionalidad+Familiar+en+Alumnos+de+1º+y+2º+grado+de+secundaria+de+la+institución+educativa+parroquial+Peq.
- [22] “Datos Climáticos Históricos - Hidrometeorología de ETESA.” <https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos> (accessed Nov. 29, 2021).
- [23] ANSI/ASHRAE, “ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings,” *Ashrae*, vol. 8400, p. 170, 2002.
- [24] R. Mora *et al.*, “ANSI/ASHRAE Standard 55-2020,” vol. 8400, 2021, [Online]. Available: www.ashrae.org.
- [25] J. Luis and J. Domínguez, “Estrategias para el Confort Térmico de Grupos en Aplicaciones de Inteligencia Ambiental,” 2021.
- [26] H. H. and H. R. J. Gholamreza Nabi Bidhendi, Touraj Nasrabadi, Hamid Reza Sharif Vaghefi, “Role of Water-Saving Devices in Reducing Urban Water Consumption in the Mega-City of Tehran, Case Study,” *J. Environ. Health*, vol. 70, no. 8, pp. 44–47, 2008, [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/26327598>.
- [27] A. Peña, “Programas de Uso Eficiente y Ahorro de Agua,” pp. 10–12, 2015, [Online]. Available: <http://smtp.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/36905/29895.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [28] B. Pirouz, S. A. Palermo, M. Maiolo, N. Arcuri, and P. Piro, “Decreasing water footprint of electricity and heat by extensive green roofs: Case of southern italy,” *Sustain.*, vol. 12, no. 23, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/su122310178.
- [29] D. Beysens, M. Muselli, M. Mileta, and I. Milimouk, “Dew and rain water collection in the Dalmatian Coast, Croatia,” vol. 92, no. 4, pp. 455–463, 2009, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.01.004>.
- [30] J. Sisolak, and K. Spataro, “TOWARD NET ZERO WATER: BEST MANAGEMENT PRACTICES FOR DECENTRALIZED SOURCING AND TREATMENT,” no. March, 2020.
- [31] US Environmental Protection Agency, “Water-Smart Landscapes: Water Efficient Landscapes Start with WaterSense,” 2013, [Online]. Available: http://www.epa.gov/WaterSense/docs/water-efficient_landscaping_508.pdf.

ANEXOS

Anexo 1. Variables de diseño en materiales de construcción.

Tabla 4. Tipos de paredes.

Nomenclatura	Tipo de pared
P1	Project wall
P2	Brick air l/w concrete block & l/w plaster
P3	Super insulated brick/block external wall
P4	Uninsulated brick/block wall
P5	Lightweight superinsulated
P6	Wall - Uninsulated - Medium weight
P7	Wall - Energy code standard - Medium weight
P8	Wall - State-of-the-art - Medium weight
P9	Wall - Uninsulated - Heavyweight
P10	Wall - State-of-the-art - Heavyweight

Tabla 4. Tipos de techos

Nomenclatura	Tipo de techo
T1	Project unoccupied pitched roof
T3	Flat roof superinsulated
T4	Pitched roof - Uninsulated - Medium weight
T5	Pitched roof - Uninsulated - Heavyweight
T8	Project pitched roof