



FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

Evaluación de Indicadores de Sostenibilidad Aplicados a la Unidad de Cuidados
Intensivos.

Proyecto final de graduación presentado como requisito para optar por el título de
Licenciatura en Ingeniería Biomédica en la Universidad Latina de Panamá

Carlos Alberto Vejas Berrio

8-931-132

Director de Tesis:

Dr. Luis C. Estrada P.

Asesor de Tesis:

Mgtr. Alfredo Lescher

Panamá, República de Panamá

2025

DEDICATORIA

A quienes supieron esperar.

A mi familia y a mis amigos, que, a pesar de mis pausas, mis distracciones, mis “el lunes empiezo” y mis silencios eternos, nunca dejaron de creer que algún día terminaría esta carrera.

A quienes me recordaron que ir lento no es lo mismo que rendirse. Que cada uno avanza a su modo, con sus propias batallas y tiempos, y que lo importante es no perder la meta de vista, aunque a veces uno se desenfoca o se pierda en el camino.

A mí mismo, por no haber soltado del todo. Por volver, una y otra vez, incluso cuando la motivación parecía haberse ido. Por haberme demostrado que, aunque haya dudas, cansancio o postergaciones, la voluntad no se extingue, solo se repliega por ratos.

A mis maestros, tutores y asesores, quienes con paciencia, sabiduría y compromiso me guiaron a lo largo de esta etapa formativa.

Su labor va mucho más allá de la transmisión de contenidos; han sido verdaderos referentes en ética, disciplina y vocación. Cada sugerencia, cada crítica constructiva y cada palabra de aliento han contribuido profundamente a este trabajo.

Esta tesis es prueba de que lo logré. Tarde, sí. Pero lo logré.



UNIVERSIDAD LATINA DE PANAMÁ

DECLARACIÓN JURADA

Yo Carlos Alberto Vejas Berrio con cedula número 8-931-132, estudiante graduando del programa/carrera de Licenciatura en Ingeniería Biomédica declaro bajo la gravedad del juramento que el material que aparece en este trabajo de graduación, en la opción: de publicación científica (tesis, proyecto final, pasantía, otro), es de mi producción intelectual, en razón de lo cual exonero a la Universidad Latina de Panamá de cualquier responsabilidad relacionada a este aspecto. Para que conste firmo la presente declaración el día 5 del mes de agosto del año 2025.

Firma del estudiante:

A handwritten signature in black ink that reads "Carlos Vejas".

Pasaporte: 8-931-132.

CONTENIDO

CAPÍTULO I	8
1.0 El Problema	9
1.1 Antecedentes del Problema de Investigación	9
1.2 Planteamiento del Problema	10
1.3 Justificación de la Investigación	10
1.4 Objetivos	12
1.4.1 Objetivos Generales.....	12
1.4.2 Objetivos Específicos.....	12
1.5 Alcance y límites de la investigación	12
1.5.1 Alcance	12
1.5.2 Límites	13
1.6. Línea de investigación a la que pertenece el estudio.....	13
CAPÍTULO II	14
2.0 Marco Teórico	15
2.1. Antecedentes de investigaciones realizadas en el tema.....	15
2.2. Bases teóricas que sustentan la investigación.....	16
2.3 Unidad de Cuidados Intensivos (UCI).....	17
2.4. El concepto de sostenibilidad en el sector salud.....	20
2.4.1 Pilar ambiental: eficiencia energética y calidad del aire en UCI.....	22
2.4.2 Pilar social: atención equitativa y condiciones laborales dignas en UCI	22
2.4.3 Pilar económico: eficiencia operativa e inversión inteligente en UCI	23
2.3. Impacto ambiental del sector salud y las UCIs	28
2.3.1 Problemas del diseño hospitalario tradicional desde la sostenibilidad.....	28
2.4 Comparación del impacto ambiental entre áreas hospitalarias críticas y no críticas	30
2.5 Características de la infraestructura hospitalaria	31
2.5.1 Consumo de energía, agua y materiales	31
2.6 Indicadores específicos para evaluar la sostenibilidad en UCI	32
2.7 Certificaciones y marcos normativos internacionales	34
2.8 Estrategias sostenibles aplicables a ucis	37

CAPÍTULO III	41
3.0 Marco Metodológico.....	42
3.1 Tipo y diseño de la investigación	42
3.2 Selección de hospitales modelo internacionales.....	43
CAPÍTULO IV.....	48
4.0 Análisis e interpretación de los resultados	49
CONCLUSIONES.....	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS	68

FIGURAS

Figura 1. Análisis comparativo cualitativo de estrategias sostenibles en hospitales analizados	45
---	-----------

TABLAS

Tabla I. Objetivos para el desarrollo de la sostenibilidad (ODS) aplicables al sector salud.....	32
Tabla II. Métricas cuantitativas por dimensión y área.	
Tabla III. Certificaciones en salud.	37
Tabla IV. Tabla de estrategias sostenibles aplicables a ucis.	40

INTRODUCCIÓN

Las Unidades de Cuidados Intensivos (UCIs) son áreas hospitalarias críticas con un alto impacto ambiental debido a su intensiva demanda de energía, agua y materiales desechables. Esta realidad convierte a las UCIs en uno de los entornos más exigentes dentro de la infraestructura hospitalaria moderna, teniendo en cuenta aspectos técnico y operativo (J.C. Gómez Chaparro, 2020). Debido a esto, las UCIs se caracterizan por tener un alto uso de energía por m² en comparación con otras áreas del hospital. Estas unidades muestran un gasto superior al promedio hospitalario (Alotaiby & Krenyacz, 2023). Y la atención médica en el mundo representa el 4.4% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero (Health Care Without Harm, 2019). Además, la mayor parte de este gasto se genera en el entorno de cuidados intensivos (Health Care Without Harm, 2019). Generando una carga ambiental que incluye un alto uso de agua y la alta generación de residuos clínicos debido al uso de insumos desechables (World Health Organization, 2021).

Como resultado, existen parámetros para la evaluación de distintos indicadores de sostenibilidad en infraestructura hospitalaria. Certificaciones como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) para Salud, EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) y el Estándar de Construcción WELL (WELL Building Standard), demuestran ser adecuadas para estas mediciones (LEED v4 for Healthcare, 2020). Sin embargo, estas certificaciones no cuentan con indicadores específicos para áreas críticas como UCIs. De modo que, se genera un vacío metodológico para evaluar su sostenibilidad de forma precisa y replicable. Por esta razón, la ejecución de diversas iniciativas demuestra la viabilidad de aplicar iniciativas sostenibles en las UCIs (Zealand, 2024).

Ahora bien, la sostenibilidad en las salas de UCIs debe ser tomada en cuenta desde el diseño de la infraestructura, la gestión operativa y la implementación de las tecnologías. Esto también incluye materiales y acabados bajos en COV (compuestos orgánicos volátiles), aislamiento, zonificación y digitalización (UNEP), 2013). Las herramientas disponibles actualmente solo toman en cuenta el edificio completo y no hay indicadores que permitan calificar el rendimiento ambiental de los elementos dentro de las UCI

(Climate-Smart Healthcare: Low-Carbon and Resilience Opportunities for the Health Sector, 2017). Por lo tanto, se debe identificar un conjunto de indicadores para determinar la sostenibilidad de las UCIs a niveles técnicos, operativos y ambientales (Fischel et al., 2019).

Este documento tiene como objetivo analizar un conjunto de indicadores de sostenibilidad compatibles con las prácticas clínicas, operativas y técnicas aplicables a UCIs, permitiendo incorporar modelos de gestión y eficiencia hospitalaria, garantizando la seguridad del paciente y el desempeño de los equipos biomédicos. Dentro de este orden de ideas, se plantea la siguiente interrogante ¿El análisis de modelos internacionales de sostenibilidad permite determinar indicadores adaptables a UCIs?.

Palabras clave — Sostenibilidad, hospitales, UCIs, indicadores, eficiencia energética, tecnología, medio ambiente.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.0 El Problema

1.1 Antecedentes del Problema de Investigación

Las Unidades de Cuidados Intensivos (UCIs) representan uno de los entornos hospitalarios más complejos, caracterizados por una elevada demanda energética, hídrica y de insumos desechables, factores que incrementan su impacto ambiental considerablemente. Diversos estudios estiman que las UCIs pueden consumir hasta tres veces más energía por metro cuadrado que otras áreas hospitalarias, además de generar un volumen superior de residuos clínicos peligrosos por cama por día (Alotaiby & Krenyacz, 2023).

A pesar de que existen certificaciones internacionales como LEED, EDGE y GGHH, estas herramientas de evaluación ambiental no contemplan métricas específicas adaptadas a áreas críticas como las UCIs (F. McGain et al., 2016). Esta omisión dificulta la medición precisa del desempeño sostenible en dichos espacios, generando un vacío técnico y normativo en los marcos actuales de sostenibilidad hospitalaria (Zealand, 2024).

Al mismo tiempo, el sector salud es responsable del 4.4 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, y una proporción importante de estas emisiones se originan en áreas críticas como las UCIs, donde el funcionamiento ininterrumpido de sistemas HVAC, dispositivos biomédicos, y medidas de bioseguridad intensiva incrementan el consumo de recursos (Gall et al., 1986).

La literatura reciente enfatiza la necesidad de establecer indicadores diferenciados que permitan evaluar y mejorar la sostenibilidad de áreas clínicas altamente especializadas, considerando no solo la infraestructura física, sino también los aspectos operativos, tecnológicos y ambientales involucrados. En consecuencia, se plantea la necesidad de desarrollar modelos de evaluación adaptados al contexto específico de las UCIs que orienten estrategias sostenibles sin comprometer la seguridad del paciente ni la eficiencia clínica.

1.2 Planteamiento del Problema

Las Unidades de Cuidados Intensivos (UCIs) son espacios clínicos esenciales para la atención de pacientes críticos, pero también figuran entre las áreas hospitalarias con mayor huella ambiental. Este impacto se refleja en su elevado consumo energético que puede superar los 2,000 kWh/m²-año, uso intensivo de agua, generación excesiva de residuos clínicos peligrosos y requerimientos continuos de sistemas de climatización, ventilación, iluminación y soporte biomédico (Blanch et al., 2016). Sin embargo, a pesar de esta alta complejidad operativa y tecnológica, los marcos internacionales de evaluación ambiental, como LEED, EDGE y GGHH, no ofrecen indicadores diseñados específicamente para medir la sostenibilidad en UCIs, limitando así su aplicabilidad real en estas áreas críticas (Czajka & others, 2020).

Esta ausencia de criterios adaptados genera un vacío metodológico que impide valorar de forma precisa el desempeño ambiental de las UCIs, dificultando la implementación de estrategias de eficiencia energética, gestión hídrica, monitoreo ambiental o selección de materiales sostenibles (Ballard & others, 2021).. Además, esta limitación afecta directamente la toma de decisiones en materia de diseño, operación y mantenimiento hospitalario, ya que no existen lineamientos estandarizados que permitan establecer metas sostenibles específicas para estas unidades.

Por tanto, es necesario identificar un conjunto de indicadores técnicos, operativos y ambientales que permitan evaluar la sostenibilidad de las UCIs de manera funcional y replicable, considerando sus particularidades clínicas y tecnológicas. La falta de estos parámetros especializados compromete tanto la eficiencia institucional como la capacidad del sistema de salud para avanzar hacia modelos de infraestructura resiliente, ambientalmente responsable y centrada en el paciente.

1.3 Justificación de la Investigación

Las Unidades de Cuidados Intensivos (UCIs) son áreas hospitalarias de alta complejidad que, si bien resultan indispensables para la atención de pacientes en estado crítico, también concentran un considerable impacto ambiental. Este impacto se manifiesta en su elevado consumo energético, alta generación de residuos infecciosos, uso intensivo

de agua y dependencia de equipamiento tecnológico que debe operar de forma continua. No obstante, a pesar de esta realidad, las herramientas de evaluación ambiental disponibles actualmente no contemplan indicadores específicos para medir la sostenibilidad de las UCIs de manera diferenciada. Este vacío metodológico dificulta la implementación de estrategias sostenibles dirigidas a mejorar su desempeño operativo y ambiental.

La importancia de esta investigación radica en su capacidad para abordar una necesidad urgente y aún poco explorada en el contexto hospitalario: la construcción de un marco de indicadores adaptado a las características particulares de las UCIs. La sostenibilidad hospitalaria no puede ser abordada únicamente desde una perspectiva general; por el contrario, requiere herramientas especializadas para aquellas áreas críticas donde la eficiencia, la seguridad del paciente y la gestión ambiental deben coexistir de forma equilibrada.

Asimismo, esta investigación ofrece una contribución significativa tanto para la ingeniería hospitalaria como para la gestión clínica, ya que permite integrar principios de sostenibilidad en los procesos de planificación, operación y mantenimiento de infraestructuras críticas. Al desarrollar un modelo base de evaluación, se facilita la toma de decisiones orientadas a la eficiencia energética, el uso racional de recursos y la reducción de la huella ambiental, sin comprometer la calidad asistencial ni la funcionalidad tecnológica de las UCIs.

Finalmente, el estudio cobra especial relevancia en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente aquellos relacionados con salud y bienestar (ODS 3), agua limpia y saneamiento (ODS 6), energía asequible y no contaminante (ODS 7), infraestructura resiliente (ODS 9) y acción climática (ODS 13). Al vincular los indicadores propuestos con estos objetivos, la investigación contribuye al desarrollo de políticas públicas y modelos de gestión hospitalaria más sostenibles, replicables y alineados con las metas globales de sostenibilidad en salud.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos Generales

- Analizar un conjunto de indicadores de sostenibilidad aplicables a las Unidades de Cuidados Intensivos (UCIs), con el fin de establecer criterios técnicos, operativos y ambientales que permitan evaluar su desempeño sostenible en el contexto hospitalario.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Revisar el estado actual de las certificaciones ambientales y su aplicabilidad en áreas críticas hospitalarias, particularmente en UCIs.
- Identificar los principales parámetros de sostenibilidad que inciden en el funcionamiento de las UCIs, tales como consumo energético, uso de agua, gestión de residuos, calidad ambiental interior, automatización y materiales sostenibles.
- Comparar casos documentados de hospitales internacionales que han implementado estrategias sostenibles en sus unidades de cuidados intensivos, analizando su viabilidad y adaptabilidad.
- Proponer un modelo base de indicadores que pueda servir como herramienta metodológica para la evaluación de sostenibilidad en UCIs, considerando criterios de medición verificables y contextualizables.

1.5 Alcance y límites de la investigación

1.5.1 Alcance

Esta investigación se enfoca en la identificación, análisis y propuesta de indicadores de sostenibilidad aplicables específicamente a Unidades de Cuidados Intensivos (UCIs) dentro del entorno hospitalario. El estudio contempla seis dimensiones clave: eficiencia energética, eficiencia hídrica, calidad ambiental interior, gestión de residuos, automatización y uso de materiales sostenibles. El enfoque es documental, comparativo y exploratorio, fundamentado en literatura científica, guías normativas internacionales, y casos reales de hospitales que han implementado estrategias sostenibles en UCIs.

El estudio no se limita a un contexto geográfico específico, sino que considera experiencias internacionales en instituciones de América Latina, Europa y Asia, con el objetivo de construir un modelo base adaptable a diferentes realidades hospitalarias. Además, se enmarca en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible aplicables al sector salud, permitiendo establecer una relación directa entre las metas globales y la práctica clínica hospitalaria.

1.5.2 Límites

Entre las principales limitaciones se encuentra la ausencia de datos primarios, ya que el estudio no incluye mediciones directas en campo ni entrevistas a personal clínico o técnico. La metodología se basa exclusivamente en fuentes secundarias como artículos científicos, informes institucionales y documentación técnica disponible públicamente.

Otra restricción es la falta de normativas internacionales específicas para evaluar la sostenibilidad de UCIs, lo que obliga a realizar adaptaciones metodológicas a partir de certificaciones diseñadas para edificaciones generales de salud. Adicionalmente, se enfrentan diferencias en la disponibilidad y calidad de la información entre hospitales, especialmente entre países desarrollados y en desarrollo, lo que limita la estandarización de los indicadores propuestos.

Finalmente, existe el riesgo de obsolescencia tecnológica en algunos de los equipos o estrategias documentadas, por lo que el modelo sugerido debe ser considerado como una base flexible sujeta a revisión periódica conforme avancen las prácticas y normativas en sostenibilidad hospitalaria.

1.6. Línea de investigación a la que pertenece el estudio

El estudio presentado pertenece a la línea de investigación en Ciencias de la Salud, específicamente en el tema de Ingeniería clínica y Biomédica titulada: Evaluación de Indicadores de Sostenibilidad Aplicados a la Unidad de Cuidados Intensivos.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.0 Marco Teórico

2.1. Antecedentes de investigaciones realizadas en el tema

En los últimos años, diversos estudios han evidenciado el elevado impacto ambiental que generan las Unidades de Cuidados Intensivos (UCIs) dentro de la infraestructura hospitalaria. Investigaciones como la de intensivos (Health Care Without Harm, 2019) han señalado que el sector salud contribuye con aproximadamente el 4.4 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, siendo las UCIs uno de los principales focos de consumo energético y generación de residuos clínicos (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2020) .

Autores como Cass et al., 2021 han realizado análisis de ciclo de vida que demuestran que una cama UCI puede generar hasta 138 kg de CO₂ y 7.1 kg de residuos sólidos por día, posicionándola como la unidad funcional con mayor huella ambiental en el entorno hospitalario. Del mismo modo, estudios como el de S. R. McGain et al., 2024 destacan la necesidad de implementar prácticas sostenibles en áreas críticas mediante indicadores que permitan monitorear variables como el consumo eléctrico, el uso del agua y la calidad del aire interior.

A nivel de infraestructura, diversos trabajos han abordado la relación entre el diseño hospitalario y la eficiencia ambiental. Por ejemplo, Fischel et al., 2019 proponen el uso de herramientas como LEED, EDGE y GGHH para evaluar la sostenibilidad en hospitales, aunque reconocen que dichas certificaciones carecen de módulos específicos para áreas críticas como las UCIs. Esta observación es compartida por See, 2023, quien recalca que la sostenibilidad en cuidados intensivos requiere parámetros de medición propios, distintos a los aplicables en zonas no críticas.

En cuanto a las estrategias aplicadas, múltiples hospitales han sido documentados como casos de referencia. El Khoo Teck Puat Hospital en Singapur, el Karolinska Institutet en Suecia y el Hospital das Clínicas en Brasil han implementado sistemas de automatización, reutilización de aguas grises y uso de materiales con baja energía incorporada, logrando mejoras comprobadas en eficiencia energética, gestión de residuos y confort ambiental (Stamouli et al., 2022).

Sin embargo, la revisión comparativa realizada en el presente estudio confirma que, a pesar de estos avances, persiste una carencia de indicadores estandarizados que permitan evaluar la sostenibilidad de las UCIs de forma precisa, replicable y alineada con los estándares internacionales. Esta falta de uniformidad en la medición limita el desarrollo de políticas institucionales efectivas y la integración de prácticas sostenibles en áreas críticas hospitalarias.

2.2. Bases teóricas que sustentan la investigación

La presente investigación se sustenta en el enfoque multidimensional de la sostenibilidad, el cual integra tres pilares fundamentales: el ambiental, el social y el económico. Esta estructura conceptual fue establecida en el Informe Brundtland 1987, el cual definió el desarrollo sostenible como aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. A partir de este marco, diversos autores han propuesto que dichos pilares deben entenderse como subsistemas interconectados, especialmente en contextos complejos como el sector salud (Psillaki et al., 2023).

Desde el punto de vista ambiental, la sostenibilidad en UCIs requiere la implementación de estrategias que reduzcan el consumo energético, mejoren la eficiencia hídrica y minimicen la huella de carbono sin comprometer la bioseguridad ni la continuidad asistencial. Estudios recientes destacan que el consumo energético en estas unidades puede superar los 2,200 kWh/m²·año, lo cual demanda intervenciones específicas en climatización, iluminación, ventilación y automatización (Lin et al., 2011).

En el eje social, se reconoce la importancia de condiciones laborales dignas para el personal de salud, así como la garantía de atención equitativa para los pacientes. La exposición continua al estrés y las condiciones intensas de trabajo en UCIs incrementan el riesgo de burnout y errores clínicos, por lo que la sostenibilidad también implica intervenciones en bienestar ocupacional, ergonomía y apoyo institucional.

Desde el pilar económico, se plantea que las estrategias sostenibles deben ser técnica y financieramente viables. El uso de herramientas como el análisis de ciclo de vida (LCA) permite evaluar el costo total de los dispositivos y tecnologías, considerando no solo su

adquisición, sino también su mantenimiento, consumo energético y vida útil. Además, la incorporación de tecnologías digitales como los sistemas BMS (Building Management Systems), sensores ambientales y gestión automatizada de recursos, ha demostrado optimizar los costos operativos y mejorar el rendimiento de las UCIs.

Finalmente, esta base conceptual se complementa con el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente los ODS 3, 6, 7, 9 y 13, los cuales guían los criterios técnicos y operativos seleccionados en este estudio. Estos fundamentos permiten estructurar una propuesta metodológica coherente y alineada con los desafíos actuales de sostenibilidad en áreas críticas hospitalarias.

2.3 Unidad de Cuidados Intensivos (UCI)

Una UCI es un sistema organizado para la atención de pacientes críticos que necesitan asistencia médica y enfermería intensiva especializada (Blanch et al., 2016). También una mayor capacidad de monitoreo y múltiples modalidades de soporte fisiológico. Con esto, se busca mantener la vida del paciente durante un período en el que se encuentra en estado crítico. Por esta razón, la función de las UCIs toma un papel muy importante dentro de las estructuras hospitalarias. Esto se debe a que proporcionan soporte vital avanzado y continuo a pacientes en un estado delicado. Es por ello, que las UCIs se diseñan con la tarea de mantener la estabilidad fisiológica mediante la constante observación y la aplicación de múltiples terapias a los pacientes. Las terapias más utilizadas en estas unidades serían la ventilación mecánica, aplicación de sedantes, utilización del agua y monitoreo hemodinámico (Gall et al., 1986). Dicho esto, distintas investigaciones han demostrado que la atención y aplicación oportuna de estas terapias reduce notablemente la muerte del paciente, particularmente en casos de sepsis, síndrome de dificultad respiratoria aguda y shock multiorgánico (Delgado & others, 2025).

En este sentido, una gestión adecuada de las UCIs involucra la toma de decisiones inmediatas y basada en evidencia científica. También el apoyo de una infraestructura que permita la intervención y ejecución del personal médico en acciones rápidas y precisas. Tomando en cuenta que estas infraestructuras físicas también deben atender criterios estrictos de bioseguridad, aislamiento, control ambiental. Todo esto, permite una

intervención médica eficiente ante cualquier descompensación fisiológica (Ballard & others, 2021). Cabe resaltar, que estas unidades funcionan con un equipo de personas altamente especializadas en esta área. Estos equipos son conformados por intensivistas, enfermería crítica, terapeutas respiratorios, farmacólogos clínicos y personal de soporte técnico (Czajka & others, 2020). Ahora bien, para orientar la atención y evaluación del progreso en el paciente, se utilizan herramientas estandarizadas. Estas herramientas son APACHE II (Acute Physiology and Chronic Health Evaluation II), este es un método de puntuación que estima la mortalidad hospitalaria a partir de variables fisiológicas, edad y comorbilidades. Por otro lado, encontramos el SOFA (Sequential Organ Failure Assessment), el cual se define como una escala que cuenta el nivel de disfunción orgánica en seis sistemas clave, facilitando el seguimiento del estado crítico del paciente (Kim & others, 2020).

Cabe considerar, que el funcionamiento de las UCIs depende de dispositivos biomédicos altamente especializados, estos permiten el monitoreo, soporte y tratamiento. De este modo, los equipos garantizan la estabilidad fisiológica del paciente. También deben operar de forma ininterrumpida, lo cual, conlleva a un elevado consumo de energía y mantenimiento (Drinhaus et al., 2023). Entre los dispositivos que más destacan encontramos los ventiladores mecánicos, esenciales para pacientes con insuficiencia respiratoria. Por otra parte, están los monitores multiparamétricos, que permiten observar continuamente datos como frecuencia cardíaca, presión arterial, saturación de oxígeno y temperatura. Estos equipos se caracterizan por ser los más utilizados dentro de una UCI. Este uso provoca un constante gasto energético, además de requerimientos específicos de mantenimiento preventivo y respaldo eléctrico (UPS) (Drinhaus et al., 2023). Al mismo tiempo, existen otros equipos como bombas de infusión, capnógrafos, sistemas de hemodiálisis y monitores de presión invasiva. Por esto, el uso contante de estos equipos requiere estar unidos a sistemas de recolección de información (Akpan & Elsen, 2024). Especialmente los que integran historiales clínicos electrónicos, alarmas inteligentes y plataformas de análisis de datos biomédicos (Rasmy & others, 2023). Esta integración, si bien mejora la continuidad del cuidado, demanda inversiones adicionales en infraestructura digital y seguridad informática.

Un aspecto crucial en la sostenibilidad del equipamiento biomédico es el mantenimiento preventivo y correctivo. Se ha demostrado que una mala gestión en el mantenimiento puede generar fallas críticas, interrupción del servicio e incluso riesgos para la seguridad del paciente (Arab-Zozani et al., 2021). En otras palabras, la falta de un plan para el mantenimiento de los equipos aumenta el uso de recursos y reduce la vida útil de los dispositivos biomédicos. Es decir, genera un impacto económico y ambiental que debe tomarse en consideración.

Con relación a lo anterior, tomamos en cuenta que el número de equipos por cama en una UCI requiere un plan detallado del espacio físico. También de los sistemas de energía, gases medicinales, HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) y respaldo. Este nivel de complejidad transforma a las UCIs en espacios de alta especialización técnica y operativa. En algunos estudios, se calcula que cada UCI puede utilizar entre 20 y 40 puntos de conexión eléctrica, datos, aire comprimido y vacío (Birnbach et al., 2021). Este nivel de complejidad transforma a cada UCI de alta especialidad técnica. Con esto, garantizamos la eficiencia clínica y sostenibilidad ambiental. Cabe resaltar, el cambio a modelos hospitalarios inteligentes, algunas instituciones están incorporando dispositivos IoT (Internet of Things) en sus UCIs. Esta tecnología permite el monitoreo remoto, predicción de fallos y mantenimiento programados. Aunque debemos mencionar, que esta tecnología ofrece ventajas operativas, también incrementa el consumo energético. Lo que representa desafíos en ciberseguridad, por esta razón debemos tomar su adopción de una manera bien planificada (Almalki et al., 2023).

Con relación a lo anterior, entendemos que las UCIs no se definen solo por su equipamiento, sino también por su modelo operativo. Esto incluye la implementación de protocolos estandarizados, sistemas de triage dinámico, personal asistencial y auditorías clínicas que aseguran la calidad en la atención (West et al., 2021). Adicionalmente, son áreas con una alta demanda energética y generación de residuos infecciosos.

Como resultado de lo antes expuesto, se tenemos en UCI una alta demanda de recursos y generación de residuos. Esto se traduce en un consumo energético considerable, estimado entre 50 y 120 kWh por cama por día, dependiendo del nivel tecnológico y las condiciones del entorno (Drinhaus et al., 2023). De igual forma, también obtenemos un

intensivo uso del agua. Esta se emplea en procesos de limpieza y esterilización (como autoclaves), humidificación activa y climatización. En hospitales europeos, se ha documentado un consumo de más de 1 300 litros diarios por autoclave, lo que demuestra la urgencia de mejorar la eficiencia de estos sistemas (F. McGain et al., 2016).

En cuanto a residuos, las UCIs generan un volumen elevado de residuos debido al uso habitual de insumos desechables. Esto nos muestra una cantidad significativa, que se clasificada como residuos infecciosos. Es decir, se encarece y complica su tratamiento (Balasubramanian et al., 2013). Este volumen se incrementa por el uso de consumibles plásticos de un solo uso como guantes, sondas, paquetes estériles y sistemas de ventilación. Además, estudios recientes han estimado que la huella ambiental de una cama UCI puede alcanzar hasta 138 kg de CO₂ por día. Este apartado incluye emisiones relacionadas al uso de electricidad, gases anestésicos, calefacción y manejo de residuos. También se reporta la generación de 7.1 kg de residuos sólidos por cama por día, siendo las UCIs el área hospitalaria con mayor impacto ambiental por unidad funcional (Cass et al., 2021).

Esta perspectiva, nos lleva a la conclusión de la necesidad de diseñar indicadores de sostenibilidad específicos para evaluar el desempeño ambiental de las UCI. De modo que, estos deben ser orientados en términos de consumo energético e hídrico, generación de residuos, y emisiones. Este tipo de indicadores son claves para encaminar nuevas políticas institucionales. Estas políticas deben ir dirigidas hacia un modelo de atención que combine eficacia clínica con responsabilidad ambiental. Esto convierte a las UCIs en un área clave para la evaluación de indicadores de sostenibilidad en el entorno hospitalario (S. R. McGain et al., 2024).

2.4. El concepto de sostenibilidad en el sector salud

La definición de la palabra sostenibilidad nace oficialmente en el Informe Brundtland 1987. Este fue redactado por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas. En este informe se define el desarrollo sostenible como “aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Development,

1987). Esta definición ha hecho que se formulen políticas ambientales y sociales en múltiples sectores, incluyendo el sector salud

Sin embargo, investigaciones recientes, como la desarrollada por Purvis, Mao y Robinson 2019, nos avisan sobre la necesidad de renovar el marco conceptual de la sostenibilidad. En su evaluación crítica, los autores nos indican que el modelo está basado en tres pilares (ambiental, social y económico) (Purvis et al., 2019). Estos han sido ampliamente aceptados, debido a la creciente complejidad de los desafíos globales y la conexión de sus dimensiones, especialmente cuando se aplica a sistemas complejos como los hospitales.

La sostenibilidad tiene tres pilares que son abordados de manera detallada por Purvis, quien argumenta que debe entenderse como subsistemas interrelacionados en lugar de entidades independientes (Purvis et al., 2019). La eficiencia energética (ambiental) puede llevar a ahorros económicos, y estos pueden reinvertirse en mejores condiciones laborales (social). Por último, el aspecto económico abarca la viabilidad financiera de la institución y la eficiencia operativa.

En el sector salud, las UCIs representan una de las áreas más desafiantes para la implementación de estrategias sostenibles. Por lo que los hospitales tienden a tener altos gastos de energía, agua y materiales. Lo cual genera residuos peligrosos y requieren un tratamiento altamente especializado. En pocas palabras, la sostenibilidad aplicada a salud involucra diseño, operación y mantenimiento que disminuyan el impacto ambiental sin arriesgar la bioseguridad ni la eficiencia del servicio (Waele et al., 2024).

En este sentido, los 3 pilares de la sostenibilidad deben adaptarse a objetivos concretos en salud. Estos deben ser la eficiencia energética y calidad del aire (ambiental), atención equitativa y condiciones laborales dignas (social), y la disminución de costos operativos con inversión inteligente (económica). Esta cobra mayor importancia en áreas críticas como UCIs. Por esto, debemos encontrar un equilibrio entre innovación tecnológica y sostenibilidad, la cual representa un gran desafío (Purvis et al., 2019).

2.4.1 Pilar ambiental: eficiencia energética y calidad del aire en UCI

El pilar ambiental de la sostenibilidad busca reducir el impacto ecológico de las infraestructuras hospitalarias. Debido a esto, se busca implementar estrategias de eficiencia energética, manejo de residuos, control ambiental y reducción de emisiones. Es por esto, que las UCIs se encuentran con un gran reto, debido a su alta carga tecnológica y estrictas condiciones de bioseguridad. Por ejemplo, el consumo energético por una cama en UCI puede superar los 10.000 kWh/año. Esta cifra sería hasta cuatro veces más que el de otras áreas del hospital (Stymiest, 2010). Dentro de este marco, la modernización de los sistemas HVAC en unidades críticas hospitalarias representa una estrategia clave para alcanzar sostenibilidad ambiental (Tehran & others, 2021). La incorporación de tecnologías como la recuperación térmica y la irradiación germicida ultravioleta (UVGI), junto con filtros HEPA de alta eficiencia, ha mostrado eficacia tanto en la contención de patógenos en el aire como en la reducción del consumo energético asociado a la climatización intensiva (Garg & Bansal, 1999), (Azimi & Stephens, 2013). Estas soluciones resultan especialmente relevantes en UCIs, donde la recirculación de aire y los controles de presión son esenciales para garantizar bioseguridad.

Por otro lado, la integración de sistemas automatizados de gestión del edificio (BMS Building Management System) permite un control preciso de variables ambientales como la humedad, temperatura, ventilación y diferencial de presión entre áreas limpias y sucias (Azimi & Stephens, 2013). Esta automatización no solo optimiza el uso energético al ajustar los sistemas según la demanda real, sino que también mejora las condiciones térmicas y funcionales del entorno clínico (Azimi & Stephens, 2013). De manera complementaria, la implementación de luminarias LED inteligentes, dotadas de sensores de ocupación y control de intensidad, ha demostrado ser eficaz para reducir significativamente el consumo eléctrico sin comprometer los requerimientos visuales de los equipos médicos (Garg & Bansal, 1999).

2.4.2 Pilar social: atención equitativa y condiciones laborales dignas en UCI

La sostenibilidad desde un punto de vista social en salud se compromete a garantizar el bienestar físico, emocional y profesional de los trabajadores como de los pacientes. En el contexto de las UCIs, el personal de salud se enfrenta a decisiones complejas bajo

presión extrema. En efecto, estas personas pasan jornadas extensas, cansancio físico, y sobrecarga emocional. Todos estos factores se asocian con burnout y errores clínicos, tal como pudimos observar en la pandemia de COVID-19 (Collaborative, 2016). En cambio, la implementación de actividades ha demostrado mejorar la satisfacción laboral y reducir el ausentismo (Shanafelt, 2022). Estas actividades son pausas activas, turnos rotativos racionales, apoyo psicológico institucional y espacios ergonómicos dentro de las UCI. Por esta razón, la calidad de vida y laboral del personal de salud es un componente para tomar en cuenta. Desde la perspectiva del paciente, la sostenibilidad social protege que se dé una atención equitativa que no vea edad, etnia o condición económica. En este sentido, la integración de políticas de acceso universal ha sido esencial para garantizar la atención justa de los pacientes en UCI (Group, 2022), (Ganapathy & others, 2022).

2.4.3 Pilar económico: eficiencia operativa e inversión inteligente en UCI

El pilar económico de la sostenibilidad en salud se basa en optimizar los recursos disponibles. Ante todo, garantizando la continuidad de servicios sin comprometer su calidad. Las UCIs, por ser áreas con un costo operativo alto, representan un especial desafío para la viabilidad financiera del hospital. Ahora bien, aplicar análisis de ciclo de vida (LCA Life Cycle Assessment) a las decisiones de compra puede ayudar a las finanzas del hospital. Esto nos permite evaluar no solo el costo inicial del equipo, sino su impacto energético, mantenimiento y vida útil (Ganapathy & others, 2022). No obstante, en escenarios de recursos limitados existen estrategias viables para la sostenibilidad. Estas estrategias van desde adquisiciones compartidas, contratos de mantenimiento preventivo hasta financiación verde pueden ofrecer solución a estos hospitales (Azimi & Stephens, 2013). Además, estudios demuestran que la digitalización de procesos en UCIs puede reducir hasta un 20 % los costos operativos anuales (Eckelman & Sherman, 2016). También el uso de historiales clínicos electrónicos, gestión automatizada de inventario y telemonitorización. Estas herramientas reducen errores médicos y optimizan la asignación de camas, logrando un impacto directo en la eficiencia del sistema.

Una vez analizados los 3 pilares de la sostenibilidad, iremos a estudiar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que podríamos aplicar al sector salud. La Agenda 2030 para

el Desarrollo Sostenible, la cual fue adoptada por la Asamblea General de las Naciones Unidas, establece un marco global mediante 17 ODS. Varios de estos influyen directamente en la transformación del sector salud. Por esta razón, mencionaremos algunos de los objetivos más influyentes en el sector salud.

El ODS 3 es uno de los objetivos fundamentados en la “salud y bienestar de las personas (United Nations, 2024e). Este constituye un pilar fundamental para transformar el sistema de salud, al asegurar una vida sana y fomentar el bienestar humano. En este objetivo se impulsan reformas para fortalecer la protección sanitaria del mundo y disminuir las diferencias cada uno de esto en el acceso a servicios médicos. Está demostrado que emplear charlas dedicadas a la prevención, el diagnóstico oportuno y la atención continua, están asociadas a mejores resultados poblacionales, disminución de la mortalidad y aumento de la esperanza de vida (Frenk & de Ferranti, 2012).

Además, la ODS 3 busca encontrar factores determinantes para el acceso a la salud. Estos pueden ser la pobreza, educación y vivienda. Vemos que estos factores son fundamentales para minimizar las diferencias al adquirir atención clínica en la población más vulnerables (Marmot et al., 2008). En este sentido, se promueve una perspectiva de salud integral y equitativa, que requiere coordinación y participación comunitaria.

En UCIs donde la atención médica define la supervivencia, este objetivo se vuelve aún más crítico. Estudios recientes demuestran que la implementación de protocolos estandarizados, capacitación continua y tecnología adecuada en UCIs mejora significativamente los resultados clínicos (Padte et al., 2024). En este sentido, crear políticas hospitalarias con la ODS 3 eleva los estándares de atención, promueve sistemas de salud más justos, eficientes y centrados en las personas.

Seguidamente, vemos la ODS 6, tiene como objetivo principal “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos (United Nations, 2024b). Este objetivo representa la ausencia de sistemas eficientes de agua y saneamiento en las UCIs. Por consiguiente, se detecta una amenaza crítica para la seguridad del paciente y la calidad del entorno clínico. Estas unidades al encontrarse en espacios cerrados requieren un suministro continuo de agua limpia y rutinas de higiene estrictas. Estudios revisan el ambiente de patógenos como *Legionella pneumophila*,

Mycobacterium avium y *Pseudomonas aeruginosa* en biofilms de tuberías hospitalarias y humidificadores relacionándolas con infecciones en pacientes inmuno comprometidos (Lin et al., 2011). Por otro lado, investigaciones en UCIs han demostrado que los pacientes en estado crítico son altamente vulnerables a infecciones nosocomiales debido a su sistema inmunológico debilitado (Gorse et al., 1989). La falta de infraestructura hídrica adecuada agrava aún el porcentaje de defunciones en este tipo de unidades. Frente a esta situación, se vuelve indispensable integrar criterios de sostenibilidad hídrica en el diseño y operación de las UCIs.

La ODS 7, tiene como objetivo la “energía asequible y no contaminante”. Esta es fundamental para garantizar la seguridad clínica y la sostenibilidad del sistema de salud. En las UCIs, el suministro eléctrico ininterrumpido es vital para que los equipos funciones de la manera correcta. Este suministro ininterrumpido alimenta equipos como ventiladores, monitores y sistemas de climatización, etc. Los breves cortes de energía pueden causar pérdida de monitoreo, comunicación, asistencias, poniendo en riesgo la vida de los pacientes (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2020). Debido a su consumo energético, las UCIs generan una huella de carbono muy alta. En especial si mencionamos a por sistemas de climatización, dispositivos de soporte vital y equipos biomédicos. Los equipos biomédicos son el principal causante del consumo energético en las UCIs (F. McGain et al., 2021). Por otro lado, la instalación de microredes fotovoltaicas ha demostrado ser una buena estrategia para el soporte eléctrico de los equipos durante cortes prolongados. Este tipo de infraestructura puede garantizar la operación sostenida y reducir significativamente los costos y emisiones en las UCIs (Hervás-Zaragoza et al., 2022).

El ODS 9, su objetivo es "Construir el desarrollo de infraestructuras resilientes y sostenibles mediante innovación tecnológica". En el contexto de las UCIs, esto implica adoptar diseños modulares, automatización energética y sistemas inteligentes. Estos sistemas deben ser capaces de ajustar ventilación, temperatura y recursos en función de la ocupación. Estas estrategias mejoran la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta frente a crisis sanitarias (United Nations, 2024d), (Stamouli et al., 2022).

En último lugar, el ODS 13, “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” (Stamouli et al., 2022). Asimismo, impulsa medidas urgentes para reducir las emisiones del sector salud en UCIs. De hecho, esto se traduce en estrategias como el uso de energías renovables, la evaluación del ciclo de vida (LCA) y la implementación del enfoque “Green ICU”, que promueve intervenciones operativas sostenibles sin comprometer la atención clínica. (Kucan et al., 2024).

La inclusión detallada de los ODS 3, 6, 7, 9 y 13 en el manuscrito responde a su articulación directa con las dimensiones operativas y técnicas evaluadas en el estudio. Cada uno de estos objetivos se vincula con criterios concretos que afectan la sostenibilidad de las UCI, y sirven como marco orientador para definir y estructurar los indicadores propuestos (Psillaki et al., 2023)..

En particular:

El ODS 3 fundamenta la dimensión clínica y de equidad en el acceso, sirviendo como base para indicadores relacionados con calidad asistencial, cobertura y bienestar del paciente crítico.

El ODS 6 está directamente vinculado a los indicadores sobre gestión de agua, saneamiento hospitalario y control de infecciones, especialmente en entornos cerrados como las UCIs.

El ODS 7 se articula con métricas de eficiencia energética, consumo eléctrico de equipos biomédicos, respaldo energético y uso de energías renovables.

Por otro lado, el ODS 9 orienta los indicadores sobre innovación tecnológica, automatización, integración de sistemas BMS y diseño resiliente de infraestructuras críticas.

El ODS 13 sustenta las evaluaciones sobre huella de carbono, emisiones asociadas a consumibles clínicos y estrategias de mitigación ambiental en áreas de alta complejidad. Así, esta sección no constituye una revisión conceptual aislada, sino una fundamentación estratégica que orienta la selección y justificación de los indicadores aplicados a las

UCIs. Su desarrollo profundo permite vincular las metas globales de sostenibilidad con los parámetros técnicos medibles propuestos en este estudio.

A continuación, se presentará la TABLA I. En esta se muestra los ODS y su aplicación en el contexto hospitalario (aplicables a UCI). Asimismo, se seleccionaron ODS directamente vinculados con la sostenibilidad ambiental, la eficiencia energética, el acceso a recursos vitales y la innovación tecnológica en salud.

Tabla I. Objetivos para el desarrollo de la sostenibilidad (ODS) aplicables al sector salud.

ODS	Nombre	Objetivo	Ref.
ODS 3	Salud y bienestar	Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos.	(Nations, 2015) (United Nations, 2024e)
ODS 6	Agua limpia y saneamiento	Garantizar la disponibilidad de agua, su gestión para el saneamiento y manejo sostenible.	(Nations, 2015) (United Nations, 2024b)
ODS 7	Energía asequible y no contaminante	Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.	(Nations, 2015) (United Nations, 2024c)
ODS 9	Industria, innovación e infraestructura	Promueve infraestructuras con innovación tecnológica	(Nations, 2015) (United Nations, 2024d)
ODS 13	Acción por el clima	Adoptar medidas con urgencias para combatir el cambio climático y sus efectos.	(Nations, 2015) (United Nations, 2024a)

2.3. Impacto ambiental del sector salud y las UCIs

La tarea principal del sector salud es preservar la vida y el bienestar humano. Según, Health Care Without Harm, 2019 el sector salud es responsable de aproximadamente el 4.4 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Estas emisiones son el equivalente a 2 giga toneladas de CO₂ anualmente (Health Care Without Harm, 2019). Por lo tanto, la huella de carbono que deja el sector salud es equivalente a la intensidad de servicios prestados y al nivel de complejidad de las instalaciones (Health Care Without Harm, 2019). Estas emisiones tienen tres indicadores principales, el consumo energético, la cadena de suministro de bienes médicos y el transporte asociado al sistema sanitario.

Por consiguiente, las UCIs se distinguen de otras áreas por su funcionamiento continuo, alto equipamiento tecnológico y condiciones ambientales controladas. La combinación de estos factores transforma a las UCIs en una de las áreas con una alta demanda de energía por metro cuadrado en los hospitales. De acuerdo con un informe del BID sobre edificaciones verdes, el consumo energético de áreas críticas puede estar entre 200 y 700 kWh/m²/año (Fischel et al., 2019). Esto se debe a la operación continua de sistemas especializados y equipamiento de alta demanda eléctrica (Fischel et al., 2019). En vista de ello, depende de factores como el clima, la tecnología utilizada, y el nivel de automatización. Este elevado consumo se debe principalmente a los sistemas de climatización (HVAC), iluminación especializada, ventiladores mecánicos, monitores y sistemas de respaldo energético que operan 24/7 (Fischel et al., 2019).

2.3.1 Problemas del diseño hospitalario tradicional desde la sostenibilidad

Los hospitales actuales son infraestructuras altamente complejas. Estas están compuestas por componentes estructurales, arquitectónicos y electromecánicos. Si lo observamos desde un punto de vista físico, un hospital se compone de cimentación, estructuras, muros divisorios, cubiertas y sistemas de cerraduras. Estas piezas son fundamentales para el funcionamiento del edificio y soportan los sistemas técnicos y operativos (UNEP), 2013). En este sentido, existen estudios que hablan de la implementación de sistemas BIM (Building Information Modeling) permite simular algunos parámetros antes de su construcción. Estos parámetros son el rendimiento

energético, iluminación natural y ventilación pasiva. Los datos de esta simulación han demostrado reducir la demanda HVAC en 15 % al optimizar la orientación y geometría del edificio durante su diseño (Li & Wang, 2022).

No obstante, vemos que el diseño hospitalario tradicional prioriza la funcionalidad clínica inmediata por encima del desempeño ambiental. Muchos hospitales fueron construidos bajo modelos lineales de consumo, materiales no sostenibles, sistemas sobredimensionados y una baja valoración de la eficiencia energética o la baja utilización de recursos naturales. Sin embargo, implementar sistemas de control inteligente dirigidos al confort del paciente, reducen entre 20 % y 30 % de la demanda energética en HVAC. En efecto, este sistema demuestra que la sostenibilidad y la operación médica eficiente pueden trabajar de la mano (Elgebaly, 2024), (Olatunde et al., 2024).

El informe del United Nations Environment Programme (UNEP) resalta que gran parte de las instalaciones hospitalarias que existen, no están diseñadas para operar de manera eficiente. Por lo tanto, se produce una sobrecarga en sistemas técnicos, gastos excesivos en operación, mantenimiento y resistencia al cambio tecnológico. Ahora bien, varios hospitales con iniciativas verdes han evidenciado mejoras en el consumo de recursos en el hospital. Como resultado se vio una reducción de hasta un 40 % en el gasto de electricidad y calefacción. Sobre todo, mejorando la salud y comodidad del paciente (Khafiso T, 2024), (Zhang, 2021).

Entre los principales problemas del diseño hospitalario tradicional se identifican:

- Falta de zonificación.
- Iluminación artificial poco eficiente.
- Sistemas HVAC poco flexibles y de alta demanda energética.
- Falta de ventilación natural y aislamiento térmico deficiente.
- Uso excesivo de materiales contaminantes.

Estos aspectos refuerzan la urgencia de reformular los criterios de diseño, renovación y operación hospitalaria bajo un enfoque sostenible, resiliente y centrado en la salud ambiental.

A este respecto, estrategias como la zonificación adaptativa basada en sensores de ocupación, fachadas con recuperadores de calor y muros trombe han sido incorporadas en entornos clínicos modernos, evidenciando una disminución en consumos de climatización de hasta un 25 % (Zhang, 2021), (Munonye & Ajonye, 2025).

2.4 Comparación del impacto ambiental entre áreas hospitalarias críticas y no críticas

Las diferencias de consumo y generación de los desechos entre áreas hospitalarias son evidentes. Las áreas críticas como las UCIs, quirófanos y salas de emergencia presentan un impacto ambiental mucho mayor que las áreas no críticas (consultorios, administración, salas de espera).

Por ejemplo, el consumo energético en UCIs podría llegar a ser tres veces más, tomando en cuenta que la generación de residuos infecciosos puede duplicarse o triplicarse (Fischel et al., 2019). Esta diferencia justifica la necesidad de desarrollar indicadores diferenciados y estrategias de sostenibilidad específicas para cada área crítica del hospital.

Por otra parte, el manejo de los residuos hospitalarios es uno de los mayores desafíos ambientales en el sector salud. A nivel mundial, se estima que un 15 % de los residuos generados en hospitales son peligrosos, incluyendo materiales infecciosos, punzocortantes, químicos y radioactivos (Organization, 2018). Las UCIs son responsables de una significativa parte de estos residuos, ya que maneja pacientes críticos con múltiples dispositivos invasivos.

Un manejo inadecuado puede producir riesgos sanitarios, contaminación del suelo y del agua. También la emisión de compuestos tóxicos al medio ambiente durante los procesos de incineración. La OMS recomienda implementar estrategias de reducción en origen, separación en sitio, y sustitución progresiva de insumos por materiales biodegradables o reutilizables (Organization, 2018). Por ejemplo, se estudió un artículo en el cual se analizaron 43 hospitales de Irán. Este artículo mostró el costo promedio de la gestión de residuos infecciosos por área. Como resultado, se vio que el precio en hospitales autosostenibles fue de USD \$0.30 por kg, frente a USD \$2.36 por kg en

hospitales nos sostenibles (Eslami et al., 2024). La diferencia entre hospitales es 8 veces más, lo que genera una carga financiera y ambiental por área crítica frente a las no críticas. También se observó que los principales generadores de residuos peligrosos dentro de los hospitales fueron los anestesiólogos (5.96 kg/día/cama). Seguidamente, las UCIs (3.37 kg/día/cama), y endoscopía (~3.09 kg/día/cama). En contraparte, las otras áreas registraron menos de 1 kg/día por cama (Eslami et al., 2024). En otro artículo en Europa, se calculó que solo del 1 al 3 % de los residuos son infecciosos. Como consecuencia, su gestión puede costar entre 5 y 10 veces más que los residuos convencionales. Esto aumenta la importancia de su adecuada gestión y tratamiento en áreas críticas (Kerekes & others, 2021).

Finalmente, prácticas avanzadas como la reprocesamiento de dispositivos de un solo uso (SUD) han logrado reducir la cantidad de residuos en más de 90 %. Por ende, se logró evitar el envío de más de 20 millones de libras de residuos del vertedero utilizando esta estrategia.(Costa F, 2020).

2.5 Características de la infraestructura hospitalaria

2.5.1 Consumo de energía, agua y materiales

Las demandas de recursos en hospitales son extremadamente altas. De acuerdo con el informe Greening Health Systems, un hospital común puede consumir hasta 3 veces más energía que un edificio comercial estándar ((UNEP), 2013). Esto se debe al uso continuo de equipos médicos, iluminación, sistemas HVAC especializados y procesos hospitalarios complejos ((UNEP), 2013).

Sin embargo, el impacto ambiental de las UCIs no se limita al consumo energético. Estas unidades también presentan un alto uso de recursos hídricos y materiales desechables. El gasto hídrico promedio puede sobrepasar los 400 litros/paciente/día. Principalmente, considerando procedimientos médicos, lavado de manos, procesos de limpieza, higiene hospitalaria, y sistemas de humidificación (Fischel et al., 2019).

El uso diario de insumos desechables en UCI contribuye directamente a la alta generación de residuos clínicos. Entre los más comunes vemos las jeringas, guantes,

sondas, bolsas intravenosas y dispositivos respiratorios. La mayoría de estos materiales son plásticos no reciclables, los cuales generan residuos que requieren tratamientos especiales (como incineración), lo que aumenta aún más la huella ecológica del sector salud (Health Care Without Harm, 2019). El uso constante de estos componentes no solo genera una considerable huella ambiental, también implica una alta dependencia de insumos desechables. Esto proviene de cadenas de suministro globales, lo cual representa un desafío particular para aquellos países con capacidades limitadas de producción local.

2.5.2 Comparación entre UCIs y otras áreas del hospital

La distribución del espacio y funcionalidad de un hospital genera distintos perfiles de consumo e impacto ambiental. Las áreas críticas, como UCIs, salas de cirugía, laboratorios y urgencias, nos muestran una gran demanda energética y de recursos. Estas son notablemente superiores a las de áreas más comunes, como consultorios, salas de espera o administración.

En el caso de un consultorio, este se puede operar con iluminación estándar y ventilación natural. Una UCI necesita sistemas HVAC, control de presión positiva, iluminación especializada, suministro continuo de energía, gases medicinales, y monitoreo ambiental constante. Esta área nos muestra una mayor generación de residuos infecciosos y requieren de un modelo más estricto de bioseguridad y mantenimiento técnico (Organization, 2018). Estas diferencias nos demuestran la obligación de diferenciar los indicadores y estrategias de sostenibilidad por áreas en el hospital.

2.6 Indicadores específicos para evaluar la sostenibilidad en UCI

La evaluación objetiva de la sostenibilidad en UCIs requiere el uso de indicadores específicos, ajustados a sus condiciones clínicas, técnicas y operativas. Estos indicadores deben ser medibles, verificables y comparables para facilitar tanto el diseño como la operación sostenible.

Este estudio clasifica los indicadores en seis parámetros de medidas técnicas, fundamentadas en literatura científica, certificaciones ambientales (LEED, EDGE,

GGHH) y casos hospitalarios documentados a nivel internacional. Cada parámetro de medida refleja un aspecto crítico del desempeño ambiental en UCIs.

En este sentido, la eficiencia energética se valora mediante el consumo energético por cama crítica (kWh/cama/mes), en el cual se integra el uso constante de ventiladores, monitores, iluminación, HVAC y sistemas de respaldo. Se complementa con el índice de intensidad energética, que se relaciona con el consumo total de la carga clínica diaria. Además, se analiza el porcentaje de energía renovable utilizada en aplicaciones no críticas, como iluminación o calentamiento de agua (Miao, 2024), (Agency, 2012).

Asimismo, la eficiencia del agua se evalúa a través del uso de dispositivos de bajo consumo, como grifería temporizada, sensores infrarrojos y sanitarios de doble descarga. Se incorpora también la presencia de sistemas de reutilización de aguas grises para fines secundarios, como riego o descarga en zonas adyacentes (Fischel et al., 2019).

Se observo que la calidad ambiental interior (IEQ) incluye parámetros como temperatura promedio (20–24 °C), humedad relativa (30–60 %) y concentración de CO₂ inferior a 1 000 ppm, esto concuerda con la normativa ASHRAE 170 (ASHRAE, 2021). También se consideran los niveles de COV presentes en los acabados, la intensidad de ruido clínico percibido en dB, y el porcentaje de iluminación natural disponible en las áreas útiles (Gómez-Ochoa & al., 2024), (Organization, 2018).

En este caso, la gestión de residuos se mide por la proporción de residuos infecciosos generados respecto al total. También se mide el porcentaje de separación en el sitio de origen. Se incluye el volumen mensual de residuos reciclables recuperados y el porcentaje de insumos reutilizables o biodegradables adquiridos institucionalmente (Sustainable Waste Management: A Guide for the Healthcare Sector, 2024).

Por último, la automatización y monitoreo digital considera el porcentaje de variables ambientales que están automatizadas mediante sistemas BMS. Se valora el tiempo promedio de respuesta ante desviaciones críticas, la integración con plataformas clínicas de monitoreo y la existencia de trazabilidad histórica de condiciones ambientales relevantes (Arrow Electronics, 2024).

Finalmente, los materiales sostenibles se analizan con base en la proporción de superficies cubiertas con materiales certificados o libres de COV. Se contempla el porcentaje de mobiliario clínico con atributos ecológicos, la incorporación de materiales con baja energía incorporada y la presencia de superficies antimicrobianas con alta durabilidad ((UNEP), 2013), (Karliner & Manogaran, 2021).

A partir de estos indicadores, se desarrollará la Tabla II, la cual es una tabla comparativa que sintetiza su aplicabilidad, unidades de medida y evidencia internacional correspondiente.

Tabla II. Métricas cuantitativas por dimensión y área.

Dimensión	Ud. de medida	UCI	Urg.	Lab.	Rad.	Admin.	Ref.
Consumo energético	kWh/m ² ·año	2200	1500	800	1200	250	(Alotaiby & Krenyacz, 2023), (Prasad & others, 2021), Haga clic o pulse aquí para escribir texto.
Uso de agua	L/paciente·día	300	50	100	80	30	(Agency, 2012),
Generación de residuos	kg/paciente·día	7.1	5.5	1.5	1.0	0.5	(Alotaiby & Krenyacz, 2023), (Smale & others, 2025)

2.7 Certificaciones y marcos normativos internacionales

El avance hacia una infraestructura hospitalaria sostenible ha promovido el desarrollo de certificaciones ambientales dirigidas al diseño, construcción y operación de centros de salud. Entre las principales herramientas se encuentran LEED for Healthcare, EDGE

(Excellence in Design for Greater Efficiencies), WELL Building Standard y la iniciativa Global Green and Healthy Hospitals (GGHH).

Estas certificaciones permiten evaluar y mejorar el desempeño ambiental de los hospitales mediante sistemas estandarizados. Su implementación facilita la obtención de indicadores cuantificables y adaptables, ajustados a diversos contextos geográficos y capacidades institucionales.

LEED v4 for Healthcare, por ejemplo, incluye criterios específicos para instalaciones clínicas, como el control de bioseguridad, la calidad del aire interior en zonas críticas y la eficiencia energética en sistemas HVAC especializados. Estas características lo hacen idóneo para hospitales con alta demanda técnica (LEED v4 for Healthcare, 2020).

EDGE, por su parte, está orientado a infraestructuras hospitalarias en países en desarrollo y propone soluciones de bajo costo. WELL incorpora dimensiones psicosociales relacionadas con el bienestar del personal y los pacientes. En cambio, GGHH promueve una transformación institucional más integral, basada en políticas operativas sostenibles ((UNEP), 2013).

Todas estas certificaciones contemplan indicadores ambientales fundamentales. Entre ellos se encuentran el consumo energético por metro cuadrado (kWh/m²/año), el consumo hídrico por paciente, la proporción de materiales con baja energía incorporada, y variables del ambiente interior como temperatura, concentración de CO₂, COV, iluminación natural y confort térmico y acústico.

La integración de estos indicadores ha permitido establecer líneas base para evaluar la sostenibilidad en hospitales de manera más sistemática y objetiva (LEED v4 for Healthcare, 2020), ((UNEP), 2013). No obstante, existen limitaciones cuando se trata de su aplicación directa en áreas críticas como las UCIs. Actualmente, ninguna de estas certificaciones contempla una subcategoría o módulo especializado para UCIs. Aunque LEED contempla requisitos generales para entornos clínicos, carece de métricas específicas para zonas con alta complejidad tecnológica, como las UCIs. Lo mismo

ocurre con EDGE y GGHH, que no ofrecen criterios dirigidos al monitoreo ambiental o eficiencia energética en estos espacios.

En consecuencia, la aplicabilidad directa de estas herramientas a UCIs resulta limitada. Ahora bien, debemos tomar en cuenta que su estructura puede ser modificada para adaptarse a las características técnicas de estas unidades, lo que abre una vía para futuras mejoras normativas (LEED v4 for Healthcare, 2020).

En la Tabla III mostramos una comparación entre todas las certificaciones mencionadas. Con esto, buscamos una visión clara de lo que se obtiene con cada certificación.

Tabla III. Certificaciones en salud.

Sistema de Certificación	Enfoque Principal	Indicadores evaluados	Aplicabilidad en UCIs	Ref.
LEED for Healthcare	Energía, agua, calidad del aire, materiales sostenibles.	Consumo energético, calidad del aire interior, eficiencia hídrica, materiales, transporte.	Media: no tiene indicadores específicos para áreas críticas.	(LEED v4 for Healthcare, 2020)
EDGE	Eficiencia energética, consumo de agua y materiales de bajo impacto.	Reducción del 20 % en energía, agua y materiales; costos de ciclo de vida.	Baja: orientada a edificios nuevos, escasa personalización por área funcional.	((IFC), 2020)
WELL Building Standard	Confort humano, calidad del aire, iluminación, ruido.	Iluminación circadiana, confort térmico, COV, ruido, bienestar emocional,	Baja: centrada en espacios de confort y bienestar general.	(Institute , 2020)
GGHH	Salud ambiental, liderazgo institucional, manejo de residuos y energía.	Residuos hospitalarios, uso de químicos, energía renovable.	Media: guía conceptual, no evalúa unidades funcionales de forma separada.	(Green & Hospitals, 2017)

2.8 Estrategias sostenibles aplicables a ucis

Las UCIs constituyen uno de los entornos hospitalarios más exigentes desde el punto de vista técnico y operativo. Frente a este panorama, la integración de estrategias sostenibles no solo es viable, sino también necesaria para disminuir el impacto ambiental sin comprometer la calidad asistencial.

A continuación, se presentan las principales medidas que podrían ser implementadas en UCIs.

La eficiencia energética puede lograrse mediante la incorporación de luminarias LED con sensores de movimiento, sistemas HVAC con recuperación de calor y paneles fotovoltaicos. Estas medidas han demostrado reducir el consumo por cama crítica sin afectar la atención clínica (Fischel et al., 2019), (Solutions Enabling the Healthcare Facility Ahead of Its Time, 2024).

En cuanto a la eficiencia hídrica, el uso de griferías temporizadas, descargas dobles y sensores infrarrojos ha permitido disminuciones del 30 % en el consumo total de agua. La reutilización de aguas grises también ha sido efectiva, sin interferir con los protocolos de asepsia ((UNEP), 2013).

Por esta razón, la mejora de la calidad ambiental interior (IEQ) requiere mantener temperaturas entre 20–24 °C, humedad relativa del 30–60 % y niveles de CO₂ inferiores a 1 000 ppm. La reducción de COV y mantener una temperatura ambiental estable se asocian a menores niveles de estrés clínico y tiempos de recuperación más rápidos (Levina et al., 2024).

La gestión de residuos es esencial en UCIs debido al alto volumen de residuos infecciosos. La separación en sitio, el uso de materiales biodegradables y la reducción de insumos desechables disminuyen errores de clasificación y los costos de disposición final (Sustainable Waste Management: A Guide for the Healthcare Sector, 2024).

En este sentido, la automatización y el monitoreo ambiental mediante sistemas BMS permite controlar variables críticas como temperatura, humedad e iluminación. La integración de sensores de medición en tiempo real fortalece la trazabilidad de los parámetros clínicos. También facilita la ejecución de intervenciones oportunas ante cualquier variación en el estado del paciente (“Circular Economy for Medical Devices: Barriers, Opportunities and Policy Recommendations,” 2024).

El uso de materiales sostenibles en UCIs incluye acabados libres de COV, mobiliario modular reciclado, pinturas ecológicas y superficies antibacterianas. Estas soluciones, alineadas con la bioseguridad clínica, han sido validadas en proyectos piloto en Europa y Asia (Global Road Map for Health Care Decarbonization, 2021).

La aplicación de estas permitiría demostrar que la adopción de estrategias sostenibles en las UCIs es técnicamente viable. A su vez, observar que son altamente efectivas en términos de reducción de impacto ambiental, eficiencia operativa y mejora de las condiciones clínicas. La diversidad geográfica de los hospitales analizados (instituciones de América Latina, Europa y Asia) demuestra que estas prácticas pueden adaptarse a distintos contextos regulatorios, climáticos y económicos. Para esto debe existir un compromiso institucional con la sostenibilidad, dado que las UCIs presentan requerimientos técnicos específicos.

Por tanto, el análisis comparativo de estas experiencias internacionales ofrece un punto de partida sólido para el diseño de un modelo base de evaluación de sostenibilidad en UCIs, aplicable en contextos hospitalarios que aún no cuentan con criterios técnicos unificados para edificación verde en salud.

La Tabla IV se resume en un conjunto de estrategias sostenibles implementadas en UCIs. Estas fueron clasificadas según su área de impacto y el indicador que podría mejorarse. Estas prácticas no solo buscan reducir el consumo de recursos, sino también mejorar la eficiencia operativa sin comprometer la seguridad del entorno clínico.

Tabla IV. Tabla de estrategias sostenibles aplicables a ucis.

Estrategia	Área de impacto	Estrategia implementada	Ejemplo de hospital aplicado	Ref.
Iluminación LED con sensores de movimiento	Energía	Reducción en consumo eléctrico	Austral (Argentina)	(Mattsson et al., 2016)
HVAC con recuperación de calor y zonificación térmica	Energía	Mejora en eficiencia energética	Khoo Teck Puat (Singapur)	(Smale & others, 2025)
Sistemas de reutilización de aguas grises	Agua	Reducción en el uso de agua potable	Hospital das Clínicas (Brasil)	(Solutions Enabling the Healthcare Facility Ahead of Its Time, 2024)
Uso de materiales sostenibles sin COV	Ambiente interior	Reducción de compuestos tóxicos y mayor confort	Karolinska (Suecia)	((UNEP), 2013)
Clasificación de residuos y uso de insumos biodegradables	Residuos	Reducción en residuos infecciosos	Karolinska (Suecia), Austral (Argentina)	(Fischel et al., 2019)

En conjunto, estas estrategias constituyen una hoja de ruta técnica para la transformación sostenible de las UCIs. La evidencia acumulada sugiere que, más allá de una exigencia normativa, la sostenibilidad en UCIs es un componente clave de la eficiencia institucional, la resiliencia hospitalaria y la mejora continua del entorno terapéutico.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLOGICO

3.0 Marco Metodológico

3.1 Tipo y diseño de la investigación

Este estudio tiene un enfoque documental, exploratorio y comparativo, buscando una orientación al estudio de los indicadores de sostenibilidad para UCIs. Esto mediante el conocimiento de los indicadores técnicos, ambientales y operativos. La investigación no tiene en cuenta una intervención experimental directa, sino el análisis sistemático de fuentes bibliográficas, documentos técnicos e iniciativas institucionales. Estas son las que permiten establecer patrones, vacíos y elementos que pueden ser copiados en el diseño de modelos sostenibles para áreas críticas (UCIs) en hospitales.

La opción de tomar un enfoque exploratorio obedece la emergencia que surge de este tema. Por esta razón, la aplicación de estrategias y herramientas en el área de UCIs aún está en proceso de afianzamiento. Esto se debe al el nulo acogimiento y escasa normalización internacional (See, 2023). En consecuencia, este tipo de estudio resulta útil para conocer el estado actual del conocimiento, identificar referentes normativos y comparar enfoques aplicados en distintos entornos enfocados a las áreas del hospital.

Además, el enfoque documental de la metodología deja ver la necesidad de dar evidencia proveniente de diversas fuentes confiables. Estas fuentes podrían ser revistas científicas, manuales técnicos de certificaciones ambientales (LEED, EDGE, GGHH), publicaciones de organismos multilaterales (OMS, IFC, BID) y casos de institucionales disponibles en medios académicos o gubernamentales. Este enfoque permite recoger la información proveniente de diferentes niveles de evidencia, dando fuerza al análisis ((IFC), 2020).

Por su parte, el enfoque comparativo es empleado para ver los indicadores extraídos con su aplicación real en hospitales que han implementado estrategias sostenibles en áreas críticas. Esta comparación busca evidenciar la viabilidad de los criterios en diversos ámbitos (económicos, tecnológicos y geográficos) (Gómez-Ochoa & al., 2024).

En síntesis, se trata de un estudio de tipo no experimental, con enfoque cualitativo y transversal. Este busca sistematizar y formular indicadores claves para un proceso de revisión y análisis estructurado. El final es brindar una herramienta metodológica que sirva para futuras aplicaciones prácticas o investigaciones en UCIs reales.

3.2 Selección de hospitales modelo internacionales

La selección de hospitales modelo representa una fase crítica del estudio, ya que permite identificar buenas prácticas, indicadores aplicados y soluciones replicables en el contexto de sostenibilidad hospitalaria. La revisión se enfocó en instituciones con intervenciones comprobadas en áreas críticas, particularmente UCIs, bajo condiciones documentadas y verificables.

Para la selección se definieron cinco criterios. En primer lugar, el reconocimiento institucional y certificación ambiental, con énfasis en hospitales acreditados bajo sistemas como LEED, EDGE, BREEAM u homologaciones regionales equivalentes ((IFC), 2020). Estas certificaciones aseguran un marco técnico normalizado para evaluar el desempeño ambiental. Segundo, se priorizó el acceso a documentación técnica confiable, incluyendo reportes de sostenibilidad, publicaciones científicas e informes institucionales. Esta condición garantiza validez técnica, replicabilidad y seguimiento de los datos presentados (Institute, 2020).

Tercero, la aplicación de estrategias sostenibles debía incluir al menos una UCI, para asegurar pertinencia clínica y relevancia operativa en áreas de alta complejidad. El cuarto criterio fue la representatividad geográfica y diversidad contextual, abarcando hospitales en América Latina, Europa y Asia. Se observaron variaciones en normativa, clima y disponibilidad tecnológica.

Finalmente, se consideró el alcance técnico replicable. En este se favorecen instituciones que presentan indicadores cuantificables, soluciones adaptadas a su contexto y experiencias documentadas.

Khoo Teck Puat Hospital (KTPH), Singapur. Es reconocido internacionalmente por su enfoque bioclimático, este hospital integra ventilación natural, iluminación solar y sistemas BMS aplicados a las UCIs (Building and Construction Authority Singapore, 2015). Dispone de certificación EDGE y estrategias como HVAC híbridos con recuperación de calor, zonificación térmica y mobiliario clínico sin COV.

Karolinska Institutet, Estocolmo, Suecia. Este es uno de los modelos de sostenibilidad. Sus UCIs incorporan sensores ambientales, gestión energética automatizada y aislamiento acústico (Petrén, 2023). Acreditado con LEED Platinum, el hospital aplica HVAC por zona crítica, control lumínico por presencia y participa en redes como Hospitals for Climate Action, asegurando trazabilidad de indicadores ambientales (Harm, 2024).

Hospital das Clínicas, São Paulo, Brasil. Este es el mayor complejo hospitalario de América Latina y ha iniciado reformas sostenibles sin certificación formal. Se han implementado sistemas HVAC VRF (flujo de refrigerante variable), sensores de ocupación, separación térmica por carga clínica y recuperación de aguas grises en UCIs (Teixeira, 2022).

Hospital Universitario Austral, Pilar, Argentina. Este hospital privado ha integrado progresivamente estrategias sostenibles. Inicialmente en áreas generales y luego en su UCI. Las intervenciones incluyen paneles solares híbridos, iluminación LED con sensores, mobiliario modular antimicrobiano y materiales con certificación ecológica (Cradle to Cradle, ISO 14001) (Austral, 2024). También destaca el seguimiento interno de residuos y su participación en iniciativas como menos Huella, Más Salud (Austral, 2020).

La inclusión de estos hospitales en la metodología nos permite construir una base comparativa sólida. Con esto, logramos comparar instituciones de distintas escalas, climas, niveles tecnológicos y marcos normativos. Esta función refuerza el valor de generar un modelo y aporta insumos para diseñar indicadores adaptables a distintos niveles de complejidad hospitalaria.

En la siguiente gráfica se muestra la comparación entre cuatro hospitales internacionales (Karolinska, Khoo Teck Puat, Hospital das Clínicas y Austral) respecto a la implementación de estrategias sostenibles. Esto se dividió en seis parámetros de medida (energía, agua, residuos, calidad del aire interior, automatización y materiales). Se observa un mayor nivel de integración en Karolinska y KTPH. También observamos un menor desempeño relativo en Hospitales de América Latina.

Figura 1. Análisis comparativo cualitativo de estrategias sostenibles en hospitales analizados.

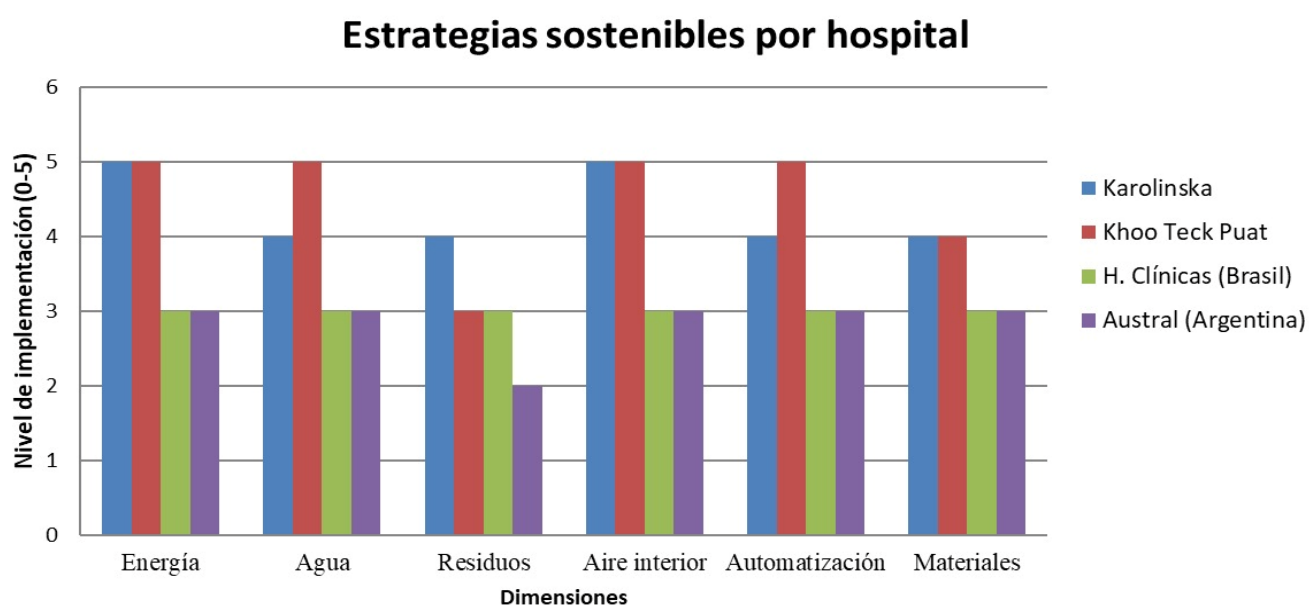


figura 1 se justifica con el objetivo de visualizar las diferencias en el grado de avance de estrategias sostenibles en los hospitales seleccionados. Se construyó una matriz de análisis comparativo cualitativo. Esta permitió asignar un nivel de implementación (de 0 a 5) en seis parámetros de medida: energía, agua, residuos, calidad del aire interior, automatización y materiales. Los valores representados en la Figura 4 se asignaron a partir de un análisis cualitativo-comparativo basado en la presencia y madurez de estrategias descritas en fuentes oficiales, reportes técnicos y literatura científica revisada para cada hospital.

La escala utilizada fue: 5 = Implementación integral, certificada y con trazabilidad documentada. 4 = Implementación parcial con indicadores técnicos disponibles. 3 = Presencia de estrategias en desarrollo o sin trazabilidad completa. 2 = Menciones generales o sin especificidad para UCIs. 1 = Ausencia de datos verificables.

Esta matriz se representa una interpretación estructurada realizada por los autores a partir del contenido técnico disponible. Su objetivo es facilitar una comparación visual ordenada y funcional que sirva como insumo para el diseño del modelo de indicadores sostenibles propuesto en este estudio.

Desarrollo del análisis cualitativo por hospital.

Karolinska Institutet (Suecia)

Energía (5): Uso de HVAC zonificado, control lumínico por presencia y sensores ambientales.

Agua (4): No se mencionan tecnologías hídricas específicas en UCIs, pero sí trazabilidad general.

Residuos (4): Participación en redes de acción climática hospitalaria que reportan residuos .

Aire interior (5): Aislamiento acústico, ventilación zonificada, sensores de calidad del aire.

Automatización (5): Gestión energética automatizada y sensores conectados a sistemas BMS.

Materiales (4): Uso de materiales certificados no se detalla, pero sí construcción bajo LEED Platinum.

Khoo Teck Puat Hospital – KTPH (Singapur)

Energía (5): HVAC híbridos con recuperación de calor, paneles solares, zonificación térmica.

Agua (5): Reutilización de aguas grises y sistemas de control hídrico.

Residuos (4): Participación en sistemas de monitoreo ambiental, aunque no se detallan datos específicos.

Aire interior (5): Ventilación natural combinada con sistemas mecánicos en zonas críticas.

Automatización (5): Sistemas BMS aplicados a UCIs, control integrado.

Materiales (4): Mobiliario sin COV y materiales con bajo impacto ambiental.

Hospital das Clínicas (Brasil)

Energía (3): HVAC VRF y sensores de ocupación, sin certificación ambiental formal.

Agua (3): Recuperación de aguas grises, pero sin trazabilidad ni indicadores externos.

Residuos (3): Manejo interno de residuos sin mención a indicadores cuantificados.

Aire interior (3): Separación térmica por carga clínica, sin datos de calidad del aire o sensores.

Automatización (3): Sensores básicos, pero sin integración con BMS ni monitoreo avanzado.

Materiales (3): Sin mención específica de materiales certificados.

Hospital Universitario Austral (Argentina)

Energía (4): Uso de paneles solares híbridos y tecnología LED.

Agua (3): No se describen tecnologías específicas para UCIs en gestión hídrica.

Residuos (3): Participación en “Menos Huella, Más Salud”, pero sin datos comparativos [91].

Aire interior (3): No se detallan sistemas específicos.

Automatización (3): Iluminación con sensores, pero sin sistemas BMS completos.

Materiales (3): Materiales certificados Cradle to Cradle, ISO 14001 y mobiliario modular.

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE
RESULTADOS

4.0 Análisis e interpretación de los resultados

Este artículo permitió analizar indicadores de sostenibilidad adaptables y aplicables a UCIs. En consecuencia, se estudiaron seis parámetros de medición aplicables a UCI, tales como: energía, agua, calidad ambiental interior, residuos, automatización y materiales. A partir de ese análisis se observó que estos indicadores pueden medirse, adaptarse e integrarse en sistemas de gestión hospitalaria ya sea UCI u otra área crítica del hospital.

En este sentido, los resultados reflejan que las UCI presentan un mayor impacto ambiental versus otras áreas del hospital. En cuanto al consumo energético, se identificó que es el indicador que muestra la mayor demanda dentro del hospital, con números que alcanzan hasta 2,200 kWh/m²·año. Esto se debe al funcionamiento continuo de sistemas HVAC y equipamiento biomédico especializado. En el parámetro del agua, la implementación de grifos temporizados y sistemas de reutilización de aguas grises permite una reducción estimada del 25 al 30 % en el uso de agua potable. Con respecto a la calidad ambiental interior, se destaca el empleo de materiales sin COV, lo que mejora las condiciones del aire y el confort ambiental, especialmente en pacientes inmunocomprometidos (Teixeira, 2022).

En relación con los residuos, la adecuada clasificación y el uso de insumos biodegradables pueden reducir hasta un 20 % los residuos infecciosos generados en estas unidades. Un estudio realizado en el Hawke's Bay Hospital ejecutó una auditoría de residuos y mostró que el 25 % de los residuos generales podrían enviarse a vertedero (Zealand, 2024). En las UCIs, el 11.4% del material reciclable se desechó en la basura general (A Beginner's Guide to Green Teams in the ICU, 2024). Por otra parte, la automatización, mediante sensores y tecnologías inteligentes, permiten una monitorización constante de los parámetros ambientales y energéticos. La implementación de estos optimiza la eficiencia operativa de los equipos biomédicos. Por último, el uso de materiales sostenibles como mobiliario y pinturas ecológicas, contribuyen a la reducción de la huella ambiental de áreas críticas como las UCI. Estos resultados aumentan la urgencia de crear indicadores específicos que permitan evaluar estas áreas de forma independiente al resto del hospital.

Al comparar los resultados con la literatura revisada, se notó una coincidencia en estudios como los de F. McGain et al., 2021 y See, 2023. En estos estudios ellos alertan sobre la alta huella ecológica de las UCI y la falta de normativas ambientales específicas para estas áreas. Asimismo, los datos son coherentes con lo documentado en las guías de Health Care Without Harm, 2019. En estas se señala lo importante que es controlar las variables ambientales como CO₂, temperatura y COVs, a diferencia de estudios enfocados en el hospital completo. De este modo, este artículo permite evaluar el impacto ambiental a nivel funcional y operativo dentro de las UCI.

Los hospitales modelo analizados apoyan los resultados obtenidos en este artículo. En instituciones como Karolinska (Suecia) y Khoo Teck Puat (Singapur) se han implementado sistemas avanzados de automatización y eficiencia energética. Con esto, lograron reducir significativamente el consumo eléctrico y emisiones. Por otro lado, hospitales latinoamericanos como el Hospital das Clínicas y el Hospital Universitario Austral han demostrado que es posible adoptar soluciones sostenibles. Incluso sin certificaciones formales, aunque tienen menos datos sobre los indicadores. Esta comparación prueba que los indicadores escogidos son adaptables a diferentes contextos económicos, normativos y tecnológicos.

A pesar de estos avances, el estudio tiene limitaciones que se relacionan a su enfoque documental. La falta de datos por UCI en América Latina y la ausencia de métricas para áreas críticas limita la uniformidad de los resultados. Además, al no haberse realizado mediciones en sitio, ni entrevistas con personal técnico, se requiere validación empírica de los indicadores escogidos. No obstante, este artículo serviría como orientación para futuras investigaciones y auditorías ambientales en UCI.

Finalmente, se recomienda el desarrollo de investigaciones prácticas, para comprobar la eficiencia de estos indicadores en hospitales reales. Así mismo, la creación de guías técnicas específicas para sostenibilidad en UCI. También se propone explorar nuevas tecnologías como IoT biomédico, materiales con baja energía incorporada y modelos predictivos de consumo. Estas tecnologías podrían lograr fortalecer la gestión ambiental de estas áreas críticas.

Ventajas y desventajas

Cualquier estudio que se base en la revisión y comparación de documentos, siempre enfrentará limitaciones. Estas pueden ser de tipo metodológico, operativo o contextual. Por esta razón, es crucial mencionarlas para que se entienda bien hasta dónde llegan nuestros resultados. Es importante destacar que estas restricciones no anulan lo que hemos concluido.

A continuación, se describen las principales restricciones identificadas:

1. Ausencia de estandarización de indicadores específicos para UCIs. Uno de los principales obstáculos en la literatura y en las certificaciones ambientales actuales es la falta de un sistema normativo internacional. Además de uno que fije indicadores técnicos específicamente diseñados para UCIs. Si bien existen estándares para edificios hospitalarios en general, estos suelen evaluar el desempeño ambiental desde una perspectiva macro, sin un desglose por unidades funcionales.

Por esta razón, se dificulta el seguimiento de datos por área crítica. En efecto, la mayoría de los informes de sostenibilidad no presentan métricas específicas para UCIs, obligando a realizar deducciones no específicas a partir de datos generales del edificio hospitalario.

2. Disparidad en la disponibilidad y calidad de la información. Otro gran reto que nos topamos fue la inconsistencia en la calidad, profundidad y formato de los datos disponibles de los hospitales estudiados. Mientras algunas instituciones (como Karolinska o KTPH) cuentan con informes detallados y seguimiento por unidad, otras presentan reportes generales, limitados o desactualizados, especialmente en el contexto latinoamericano. Esto puede desviar el análisis, ya que no todas las estrategias están igualmente documentadas ni sometidas a auditorías externas.

3. Enfoque no experimental. El esquema metodológico del estudio es de tipo documental, exploratorio y comparativo. Sin la recopilación de datos primarios ni intervención directa sobre las instituciones analizadas. Esto implica que no se realizaron visitas técnicas a hospitales, no se aplicaron cuestionarios ni entrevistas a personal clínico o técnico, y no se hizo seguimiento de los resultados ambientales.

4. Limitaciones contextuales y económicas. Este estudio no aborda de forma directa las limitaciones económicas, logísticas o políticas que podrían existir en algunos hospitales. Por ello, es importante implementar estrategias sostenibles, especialmente en países de ingresos bajos o medianos. Si bien se analizan indicadores escalables, su viabilidad dependerá de múltiples factores externos al diseño metodológico. Estos serían la normativa sanitaria nacional, la capacidad de inversión institucional, cultura general del país, infraestructura ya existente.

5. Riesgo de obsolescencia tecnológica. Dado que el campo de la sostenibilidad hospitalaria evoluciona rápidamente, existe el riesgo de que algunos indicadores, materiales o tecnologías referenciadas pierdan vigencia en pocos años. Por ello, el modelo propuesto debe ser actualizado periódicamente y vinculado a fuentes dinámicas como actualizaciones LEED, EDGE.

6. Desigualdad institucional en el acceso a la publicación científica. Numerosos hospitales que adoptan procesos de sostenibilidad publican sus resultados en reportes internos o medios institucionales. Lo cual, puede generar desigualdad en la información y falta de revisión de este. Este fenómeno limita la objetividad de algunos indicadores reportados y refuerza la necesidad de la recopilación bibliográfica.

Aunque estas limitaciones hacen que nuestro estudio sea más bien exploratorio, eso no le resta importancia. De hecho, lo convierten en un paso crucial para poder validar un modelo de indicadores que realmente sirva en las UCIs. La idea es que, en el futuro otras investigaciones puedan superar estas barreras. Podría ser con un análisis directamente en el terreno, con estudios de caso más largos o incluso poniendo a prueba algunas propuestas ya existentes.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Este estudio permitió identificar y analizar un conjunto de indicadores aplicables específicamente a las UCIs. Estos indicadores se basaron en seis parámetros esenciales para evaluar su sostenibilidad ambiental y operativa. El enfoque utilizado integró elementos técnicos, normativos y de casos reales que reflejan las condiciones de alta complejidad de estas áreas críticas.

Se demostró que existen estrategias sostenibles viables para UCIs que no comprometen la seguridad clínica ni la eficiencia del servicio. Indicadores como la eficiencia energética, el control ambiental interior y la clasificación adecuada de residuos, representan oportunidades de mejora con beneficios documentados en instituciones de salud de diversos contextos.

El análisis comparativo entre hospitales nos permitió visualizar buenas prácticas replicables y limitaciones comunes en cuanto a la disponibilidad de indicadores específicos para áreas críticas. Esto deja en evidencia una deficiencia en la regulación normativa que podría ser atendida mediante la adaptación de indicadores o certificaciones ya existentes. Además, se puede estudiar la futura construcción de criterios especializados.

De este modo, se reconoce que la sostenibilidad hospitalaria debe abordarse de forma integral, incorporando dimensiones ambientales, sociales y económicas. La implementación progresiva de mejoras sostenibles en UCIs podría traducirse en mayor solidez institucional, reducción de costos operativos y mejoras en el entorno terapéutico.

Este trabajo es un análisis crítico de la sostenibilidad en áreas hospitalarias de alta demanda. También puede servir como herramienta para auditorías internas y procesos de mejora continua. Se recomienda continuar con estudios empíricos que validen estos indicadores en entornos reales. Sobre todo, en proyectos piloto en UCIs de distintas escalas y entornos geográficos. De esta manera, nace una línea de investigación para el diseño de indicadores en certificación ambiental específico para áreas críticas como las UCIs. Estas deben contemplar métricas diferenciadas y adaptables su entorno.

El desarrollo de una guía estructurada con normativas y basadas en evidencia científica nos da una hoja de ruta a la sostenibilidad. Asimismo, estas deben ser aplicables tanto en hospitales nuevos como en los ya existentes. De esta manera, se presenta la oportunidad para avanzar hacia infraestructuras hospitalarias verdaderamente sostenibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A Beginner's Guide to Green Teams in the ICU. (2024). ANZICS and Intensive Care Society (UK). <https://anzics.org/wp-content/uploads/2022/04/A-beginners-guide-to-Sustainability-in-the-ICU.pdf>

A process-based life cycle assessment of the climate impact of a Swedish intensive care unit. (2024). *PubMed Central (PMC)*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12134305/>

Agency, U. S. E. P. (2012). *WaterSense at Work: Best Management Practices for Commercial and Institutional Facilities.*

Akpan, Y., & Elsen, R. (2024). Modern ICU design: A literature review on layout, infection control, and technology integration. *International Journal of Medical Science and Health Research*, 4(4), 40–63. https://www.researchgate.net/publication/384430156_Modern_Intensive_Care_Unit_Design_A_Literature_Review

Almalki, A., Khan, A. I., Hossain, M., Alzahrani, M., Almalki, A., & Almalki, F. (2023). Healthcare Internet of Things (H-IoT): Current Trends, Future Prospects, Applications, Challenges, and Security Issues. *IEEE Access*. https://www.researchgate.net/publication/370375282_Healthcare_Internet_of_Things_H-IoT_Current_Trends_Future_Prospects_Applications_Challenges_and_Security_Issues

Alotaiby, A., & Krenyacz, E. (2023). “Energy efficiency in healthcare institutions.” *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 45(4), 494–501. <https://akjournals.com/view/journals/204/45/4/article-p494.xml>

Arab-Zozani, M., Ghodsi, H., & Pezeshki, M. (2021). Assessment of medical equipment maintenance management in hospitals: a systematic review. *Biomedical Engineering*

Online, 20, 49. <https://biomedical-engineering-online.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12938-021-00885-5>

Arrow Electronics. (2024). *Smart Hospital Technologies and Solutions in the Intensive Care Unit*. <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/smart-hospital-technologies-and-solutions-in-the-intensive-care-unit>

ASHRAE. (2021). *Standard 170-2021: Ventilation of Health Care Facilities*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. https://www.techstreet.com/standards/ashrae-170-2021?product_id=2222136

Austral, H. U. (2020). *Premio por compras sostenibles*. <https://www.hospitalaustral.edu.ar/2020/11/premio-para-el-hospital-austral-por-compras-sostenibles/>

Austral, H. U. (2024). *Programa Medioambiente*. <https://www.hospitalaustral.edu.ar/quienes-somos/calidad-y-seguridad/medioambiente/>

Azimi, M., & Stephens, B. (2013). *HVAC Filtration and Energy Implications in Healthcare Facilities*. https://built-envi.com/publications/azimi_stephens_2013_be_influenza_filtration.pdf

Balasubramanian, C., Prasad, P., & Raghavan, D. (2013). Environmental sustainability in hospitals – A systematic review. *Journal of Health Services Research & Policy*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24813186/>

Ballard, J. H., & others. (2021). Critical-care-unit bedside design and its impact on infection transmission during construction and renovation. *Journal of Hospital Infection*, 110, 25–32. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10981659/>

Birnbach, D. J., Rosenberg, J. R., Fitzpatrick, D., & Carling, J. (2021). Operating room environmental services do not clean everything they should: A direct observation study. *American Journal of Infection Control*, 49(7), 845–850. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8068504/>

- Blanch, L., Abillama, F., Amin, P., Christian, M., Joynt, G., Myburgh, J., Pelosi, P., Vincent, J.-L., Zuccarino, F., & Azoulay, E. (2016). What is an intensive care unit? A report of the task force of the World Federation of Societies of Intensive and Critical Care Medicine. *Journal of Critical Care*, 36, 301–305. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2016.07.015>
- Building and Construction Authority Singapore. (2015). *EUROPEAN HEALTHCARE DESIGN 2017*.
- Cass, A. J., Zimmerman, J. M., & Lee, E. C. (2021). Environmental footprint of regular and intensive inpatient care in a US tertiary hospital: life cycle assessment of ICU vs. general care. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 779–793. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-021-01998-8>
- Centers for Disease Control, & (CDC), P. (2019). *Emergency Water Supply Planning Guide for Hospitals and Health Care Facilities*. <https://www.cdc.gov/water-emergency/media/pdfs/2024/07/emergency-water-supply-planning-guide-2019-508.pdf>
- Circular economy for medical devices: Barriers, opportunities and policy recommendations. (2024). *Resources, Conservation and Recycling*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107719>
- Climate-Smart Healthcare: Low-carbon and Resilience Opportunities for the Health Sector*. (2017). World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/27809>
- Collaborative, C. C. S. (2016). *Burnout Syndrome in Critical Care Health-care Professionals: A Call for Action*. <https://www.thoracic.org/statements/resources/cc/burnout-syndrome.pdf>
- Costa F, P. M. E. C. (2020). Reprocessing of Single-Use Medical Devices in hospital environment: evolution and future perspectives. *Waste Management*, 104, 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.021>

- Czajka, S., & others. (2020). Validation of APACHE II, APACHE III and SAPS II scores in a mixed adult ICU in Poland. *BMC Anesthesiology*, 20, 296. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33267777/>
- Delgado, S. I., & others. (2025). Complex Sepsis Presentations, SEP-1 Compliance, and Outcomes. *JAMA Network Open*. <https://jamanetwork.com/journals/jamanetworkopen/fullarticle/2831700>
- Development, W. C. on E. and. (1987). *Our Common Future (Informe Brundtland)*. Oxford University Press. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- Drinhaus, H. R., Brandt, T. D., & Riedel, M. L. (2023). What(w)at counts in electricity consumption in the intensive care unit. *BMC Anesthesiology*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10119198/>
- Eckelman, J., & Sherman, K. (2016). *Hospital Energy Benchmarking Guidance Version 1.0*. <https://escholarship.org/content/qt4k88k7qd/qt4k88k7qd.pdf>
- Elgebaly, D. (2024). Sustainable HVAC System Using Energy Modeling. *Sustainability*, 17(8), 3312. <https://doi.org/10.3390/su17083312>
- Eslami, A., Khayami, A., & others. (2024). Economic evaluation of hazardous healthcare waste treatment systems: a case study in Iran. *Scientific Reports*, 14, 69940. <https://www.nature.com/articles/s41598-024-69940-0>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2020). *Healthcare Facilities and Power Outages: Guidance for Resilient Planning*. <https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-07/healthcare-facilities-and-power-outages.pdf>
- Fischel, E., Sánchez, I., & Núñez, G. (2019). *Edificios verdes para el sector salud: Identificación de medidas costo-efectivas para un diseño sostenible*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

- Frenk, J., & de Ferranti, D. (2012). Universal health coverage: the third global health transition? *The Lancet*, 380(9845), 861–862. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61340-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61340-3)
- Gall, J. Le, Loirat, P., & Alpérovitch, A. (1986). APACHE II—A severity of disease classification system. *Critical Care Medicine*, 14(8), 754–755. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3087704/>
- Ganapathy, K., & others. (2022). *Telemedicine to Expand Access to Critical Care Around the World*. <https://www.binasss.sa.cr/oct22/21.pdf>
- Garg, V., & Bansal, N. K. (1999). Smart Occupancy Sensors to Reduce Energy Consumption. *Energy and Buildings (Elsevier)*. https://www.researchgate.net/publication/222702674_Smart_occupancy_sensors_to_reduce_energy_consumption
- Global Road Map for Health Care Decarbonization*. (2021). Health Care Without Harm. https://healthcareclimateaction.org/sites/default/files/2021-06/Health%20Care%20Without%20Harm_Health%20Care%20Decarbonization_Road%20Map.pdf
- Gómez-Ochoa, F., & al., et. (2024). GREEN ICU: Unidad de Cuidados Intensivos responsable y sostenible. *Medicina Intensiva*, 48(4). <https://www.medintensiva.org/es-green-icu-unidad-cuidados-intensivos-articulo-S0210569123003194>
- Gorse, G. J., Messner, R. L., & Stephens, N. D. (1989). Association of malnutrition with nosocomial infection. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 10(5), 194–203. <https://doi.org/10.1017/S0195941700065010>
- Green, G., & Hospitals, H. (2017). *Global Green and Healthy Hospitals Agenda*.
- Group, E. T. W. (2022). Triage of Intensive Care Patients: identifying agreement and controversy. *Journal of Medical Ethics*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5549951/>
- Harm, H. C. W. (2024). *Health Care Climate Council*. <https://climatecouncil.noharm.org/>

- Health Care Without Harm. (2019). *Health care's climate footprint: How the health sector contributes to the global climate crisis*. Health Care Without Harm. <https://noharm-global.org/documents/health-care-climate-footprint-report>
- Hervás-Zaragoza, J., Castilla, M., Roca, J. A., González-Vidal, A., & Skarmeta, A. F. (2022). Microgrids as a mechanism for improving energy resilience during grid outages: A post-COVID-19 case study for hospitals. *Renewable Energy*, 199, 308–319. <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/119120/1/1-s2.0-S0960148122013106-main.pdf>
- (IFC), I. F. C. (2020). *EDGE User Guide for Hospitals*. International Finance Corporation. <https://edgebuildings.com/wp-content/uploads/2022/04/211026-EDGE-User-Guide-for-All-Building-Types-Version-3.0.A.pdf>
- in Future, G. (2018). *Khoo Teck Puat Hospital – Biophilic Design*. https://greeninfuture.com/pdf/greenPulse_Jan2018.pdf
- Institute, I. W. B. (2020). *WELL Building Standard v2 – Concepts*.
- J.C. Gómez Chaparro. (2020). “*Impacto de la ingeniería hospitalaria en el mantenimiento*” (Ph. D. Thesis). Universidad de Extremadura. https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/11701/1/TDUEX_2020_Gomez_Chaparro.pdf
- Karliner, J., & Manogaran, S. (2021). Climate-smart healthcare: What does it entail? In *Climate Change and the Health Sector: Healing the World* (pp. 119–130). Routledge India. <https://doi.org/10.4324/9781003190516-16>
- Kerekes, A., & others. (2021). A Review on Medical Waste Management: Treatment, Recycling methods and cost effect. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 9, 146. <https://www.mdpi.com/2076-3298/9/11/146>
- Khafiso T, A. S. A. C. (2024). Assessment of energy-saving strategies mitigating high energy usage in residential buildings. *Property Management*. <https://doi.org/10.1108/pm-12-2024-0126>

- Kim, K., & others. (2020). Mortality Prediction Using SOFA Score in Critically Ill Surgical Patients. *Supportive Care in Cancer*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32512741/>
- Kucan, G., Eiring, A., Schaffner, T., Haselsteiner, J., Pung, H., & Larsen, L. B. (2024). *Sustainable Future-Proofing Healthcare Facilities: A Modular and Adaptable Design Approach*. https://www.researchgate.net/publication/380462104_Sustainable_Future-Proofing_Healthcare_Facilities_A_Modular_and_Adaptable_Design_Approach
- LEED v4 for Healthcare*. (2020). U.S. Green Building Council. <https://www.usgbc.org/leed/v4>
- Levina, A., Ilin, I., Gugutishvili, D., & Kochetkova, K. (2024). Towards a Smart Hospital: Smart Infrastructure Integration. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(11). <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100339>
- Li, Y., & Wang, H. (2022). BIM-Based Green Hospital Building Performance Pre-Evaluation: A Case Study. *Sustainability*, 14(4), 2066. <https://doi.org/10.3390/su14042066>
- Lin, Y. E., Stout, J. E., & Yu, V. L. (2011). Controlling Legionella in hospital drinking water: an evidence-based review of disinfection methods. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 32(2), 166–173. <https://doi.org/10.1086/657934>
- Marmot, M., Friel, S., Bell, R., Houweling, T. A. J., & Taylor, S. (2008). *Closing the gap in a generation: health equity through action on the social determinants of health*. World Health Organization. https://books.google.com.pa/books?hl=es&lr=&id=zc_VfH7wfV8C
- Mattsson, P., Laike, T., & Johansson, M. (2016). Factors affecting optimal lighting use in shared hospital environments: A case-study. *Building and Environment*, 96, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.026>
- McGain, F., Kuppusamy, A. R., Story, C. J., Saunders, C., Ramanan, S., & McGain, F. D. (2021). The carbon footprint of treating patients with septic shock in the ICU. *Critical Care*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s13054-021-03459-5>

- McGain, F., Naylor, D., King, R., & Tait, S. (2016). Steam sterilisation's energy and water footprint. *American Journal of Infection Control*, 44(3), 272–277. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27075773/>
- McGain, S. R., Humphrys, T., Yurek, J. D., & others. (2024). Environmental sustainability in intensive care: key factors in energy, waste, and carbon footprint. *Critical Care*, 28(1). <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10515098/>
- Miao, Y. (2024). Crafting sustainable healthcare environments using green building rating systems. *Sustainability*, 16(5), 1954. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/5/1954>
- Munonye, W. C., & Ajonye, G. O. (2025). Energy-driven circular design in the built environment: rethinking architecture and infrastructure. *Frontiers in Sustainable Cities*, 7, 1569362. <https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1569362>
- Nations, U. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Olatunde, T., Enabulele, M., & Obanor, F. O. (2024). Review of energy-efficient HVAC technologies for sustainable buildings. *International Journal of Scientific and Technical Research in Architecture*. https://www.researchgate.net/publication/380207442_Review_of_energy-efficient_HVAC_technologies_for_sustainable_buildings
- Organization, W. H. (2018). *Health-care waste, Fact Sheet*. World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste>
- Padte, S., Venkata, V. S., Mehta, P., Tawfeeq, S., Kashyap, R., & Surani, S. (2024). 21st Century Critical Care Medicine: An Overview. *World Journal of Critical Care Medicine*, 13(1), 90176. <https://doi.org/10.5492/wjccm.v13.i1.90176>
- Petrén, M. H. E. A. L. (2023). *Environmental Review 2023 Sustainable Development & Equal*.
- Prasad, P. A., & others. (2021). Environmental footprint of regular and intensive inpatient care in a large US hospital. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 779–793. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01998-8>

- Psillaki, P., Tsiamitros, E., Misopoulou, K., & Frangopoulos, C. A. (2023). Hospitals' Energy Efficiency in the Perspective of Saving Resources and Providing Quality Services through Technological Options: A Systematic Literature Review. *Energies*, *16*(2). <https://doi.org/10.3390/en16020755>
- Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability Science*, *14*, 681–695.
- Rasmy, C. S., & others. (2023). A review of AI applications in ICU patient monitoring and decision support. *Frontiers in Medicine*, *10*, 1109411. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmed.2023.1109411/full>
- See, K. C. (2023). Improving environmental sustainability of intensive care units: a mini-review. *World Journal of Critical Care Medicine*, *12*(4), 217–225. <https://www.wjgnet.com/2220-3141/full/v12/i4/217.htm>
- Shanafelt, T. (2022). *Physician Well-being 2.0: Where Are We and Where Are We Going?* <https://www.aeromedconference.com/wp-content/uploads/2022/09/Wellbeing-2.0-Shanafelt.pdf>
- Smale, C., & others. (2025). How to interpret green? A multiple perspective approach to sustainability in the ICU. *Critical Care*, *29*, 80. <https://doi.org/10.1186/s13054-025-05316-8>
- Solutions enabling the healthcare facility ahead of its time.* (2024). Schneider Electric. <https://www.se.com/us/en/download/document/998-23346267/>
- Stamouli, D. H., Michalopoulos, P. G., Latsou, M. A., & Liosis, S. K. (2022). Next level of hospitalisation through smart ICU. *Sensors and Actuators Reports*, *4*. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2022.100113>
- Stymiest, D. (2010). *Health Care Energy Management Benchmarking*. https://www.ssr-inc.com/wp-content/uploads/07.01.10_HealthCare_Energy_Management_Benchmarking.pdf

- Sustainable waste management: A guide for the healthcare sector.* (2024). Health Care Without Harm. <https://europe.noharm.org/resources/sustainable-waste-management-guide-healthcare-sector>
- Tehran, H. A., & others. (2021). Air Pollution in Hospitals: A Critical Public Health Emergency. *Unspecified Source*. https://www.health-providers.ir/article_216591_9759a3c4d5566b11d0c0917dfd2d3211.pdf
- Teixeira, P. M. V. (2022). *Eficiência Energética em Instalações Hospitalares*.
- (UNEP), U. N. E. P. (2013). *Greening Health Systems*. World Health Organization. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/350539/WHO-EURO-2013-4501-44264-62527-eng.pdf>
- United Nations. (2024a). *Acción por el clima - Objetivo de Desarrollo Sostenible 13*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- United Nations. (2024b). *Agua limpia y saneamiento - Objetivo de Desarrollo Sostenible 6*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- United Nations. (2024c). *Energía asequible y no contaminante - Objetivo de Desarrollo Sostenible 7*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- United Nations. (2024d). *Industria, innovación e infraestructura - Objetivo de Desarrollo Sostenible 9*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- United Nations. (2024e). *Salud y bienestar - Objetivo de Desarrollo Sostenible 3*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>
- Waele, J. J. De, Hunfeld, N., & Baid, H. (2024). Environmental sustainability in intensive care: the path forward — An ESICM Green Paper. *Intensive Care Medicine*, 50(11), 1729–1739. <https://doi.org/10.1007/s00134-024-07662-7>
- West, J., Jarvis, S., Williamson, L., & others. (2021). Workforce management and patient outcomes in intensive care: insights from COVID-19. *Journal of Clinical Nursing*, 30(1), 120–133. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8447459/>

World Health Organization. (2021). *Climate change and health*. World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>

Zealand, T. W. O. H. N. (2024). *Hawke's Bay Hospital*.

Zhang, X. (2021). Optimizing the energy saving potential of public hospital through a systematic approach for green building certification in Malaysia. *Energy Reports*. https://www.researchgate.net/publication/354006695_Optimizing_the_energy_saving_potential_of_public_hospital_through_a_systematic_approach_for_green_building_certification_in_Malaysia

ANEXOS



SEDE CENTRAL

FORMULARIO DE ENTREGA DE PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

Nota: Llenar este formulario a máquina de escribir. Entregar este formulario junto con el Proyecto Final de Graduación y los Paz y Salvo

Por este medio, notifico que el Proyecto

Titulado: Evaluación de Indicadores de Sostenibilidad Aplicados a la Unidad de Cuidados Intensivos.

Correspondiente al estudiante: CARLOS ALBERTO VEJAS BERRIO

De la carrera: Licenciatura en Ingeniería Biomédica e Instrumentación

Doy fe que he revisado y autorizado la entrega del Proyecto Final de Graduación (Documento Final), a Secretaría Académica, por reunir los requisitos y acatamientos exigidos por la Universidad Latina de Panamá y sugiere se le asigne la fecha para su defensa oral (sustentación).

Autorización del Director del Proyecto Final de Graduación:

Nombre del Profesor Director: Luis Estrada Petrocelli

Firma de Autorización

Teléfono: 6126-3467

Autorización del Profesor responsable del Curso Proyecto Final de Graduación:

Nombre del Profesor: Alfredo Lescher

Firma de Autorización

Teléfono: 6126-3467

En caso de revisión de un Profesor de Español

Notifico que doy fe que el documento cumple satisfactoriamente con todos los requisitos formales de ortografía y de redacción exigidos por el idioma español.

Nombre del Profesor de Español: RAQUEL ESCALA

Autorización

Firma del Estudiante Fecha de



Entrega: 22 de agosto de 2024

Recibido por _____ Fecha _____

Panamá, _____



Carta de revisión del Profesor de Español

Panamá, 22 de agosto de 2025

Señores:

UNIVERSIDAD LATINA DE PANAMA

E. S. D.

Estimados Señores:

La (El) suscrita(o) notifica haber revisado por solicitud del estudiante Carlos Alberto Vejas Berrío con cédula de identidad personal número 8-931-132, el proyecto final de graduación titulado “Evaluación de Indicadores de Sostenibilidad Aplicados a la Unidad de Cuidados Intensivos” y a su vez doy fe que el documento cumple satisfactoriamente con todos los requisitos formales de ortografía y de redacción exigidos por el idioma español.

Atentamente,

Firma del profesor de Español

REPÚBLICA DE PANAMÁ
TRIBUNAL ELECTORAL

Raquel Elida Escala Diaz

NOMBRE USUAL:
FECHA DE NACIMIENTO: 27-MAY-1971
LUGAR DE NACIMIENTO: PANAMÁ, PANAMÁ
SEXO: F TIPO DE SANGRE:
EXPEDIDA: 06-JUN-2019 EXPIRA: 06-JUN-2029

376-39



UNIVERSIDAD DE PANAMA
LA FACULTAD DE
Humanidades

EN VIRTUD DE LA POTESTAD QUE LE CONFIEREN LA LEY Y EL ESTATUTO UNIVERSITARIO,
HACE CONSTAR QUE

Raquel Elida Escala Diaz

HA TERMINADO LOS ESTUDIOS Y CUMPLIDO CON LOS REQUISITOS
QUE LE HACEN ACREEDOR AL TITULO DE
*Licenciada en Humanidades
con Especialización en Español*

Y EN CONSECUENCIA, SE LE CONCEDE TAL GRADO CON TODOS LOS DERECHOS,
HONORES Y PRIVILEGIOS RESPECTIVOS, EN TESTIMONIO DE LO CUAL SE LE EXPIDE
ESTE DIPLOMA EN LA CIUDAD DE PANAMA A LOS *tres*
DIAS DEL MES DE *Marzo* DE MIL NOVECIENTOS *veintisiete y siete*


Secretaría General
Diploma 54156
Identificación Personal 8-376-39


Decano


Rector





UNIVERSIDAD DE PANAMA

LA FACULTAD DE

Ciencias de la Educación

EN VIRTUD DE LA POTESTAD QUE LE CONFIEREN LA LEY Y EL ESTATUTO UNIVERSITARIO,
HACE CONSTAR QUE


Raquel Elida Escala Díaz

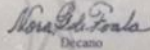
HA TERMINADO LOS ESTUDIOS Y CUMPLIDO CON LOS REQUISITOS
QUE LE HACEN ACREEDOR, CON ALTOS HONORES, AL TITULO DE

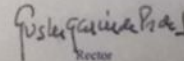
**Profesora de Educación Media con
Especialización en Español**

Y EN CONSECUENCIA SE LE CONCEDE TAL GRADO CON TODOS LOS DERECHOS,
HONORES Y PRIVILEGIOS RESPECTIVOS, EN TESTIMONIO DE LO CUAL SE LE EXPIDE
ESTE DIPLOMA EN LA CIUDAD DE PANAMÁ, A LOS *diecinueve*
DÍAS DEL MES DE *junio* DEL AÑO DOS MIL *siete*.

Diploma 148,376
Identificación Personal 8-376-39


Secretario General


Decano


Rector

Evaluación de Indicadores de Sostenibilidad Aplicados a la Unidad de Cuidados Intensivos.

Evaluation of Sustainability Indicators Applied to the Intensive Care Unit

Carlos Vejas
 Universidad Latina de
 Panamá Facultad de
 ingeniería
 Panamá, Panamá
carlosvejasjr@hotmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-9304-736X>.

Brian Artuz
 Universidad Latina de
 Panamá Facultad de
 ingeniería
 Panamá, Panamá
brianartuz24@hotmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-1151-1435>.

Dr. Luis Estrada
 Universidad Latina de
 Panamá
 Facultad de Ingeniería
 Ciudad de Panamá,
 Panamá
lestrada@ulatina.edu.pa
<https://orcid.org/0000-0002-4126-4462>.

Abstract— *Intensive Care Units (ICUs) are critical hospital areas with a high environmental impact due to their intensive demand for energy, water, and disposable materials. This documentary and comparative study analyzes sustainability evaluation indicators specifically for ICUs, considering technical, operational, and environmental metrics. International certifications such as LEED, EDGE, WELL, and GGHH are reviewed, along with model hospitals from different geographical contexts. Six key dimensions are identified: energy efficiency, water efficiency, indoor environmental quality, waste management, automation, and sustainable materials. The analysis of these indicators could support hospital management frameworks aimed at improving the operational efficiency of ICUs, while ensuring a feasible transition toward more sustainable critical care environments.*

Keywords— Sustainability, hospitals, ICUs, indicators, energy efficiency, technology, environment.

Resumen— *Las Unidades de Cuidados Intensivos (UCIs) son áreas hospitalarias críticas con un alto impacto ambiental. Esto se debe a su demanda intensiva de energía, agua y materiales desechables. Este estudio documental y comparativo analiza indicadores de evaluación de sostenibilidad específicos para UCIs, considerando indicadores técnicos, operativos y ambientales. Se analizan certificaciones internacionales como LEED, EDGE, WELL y GGHH, y se revisan hospitales modelo en diferentes contextos geográficos. Se identifican seis parámetros claves de medición: eficiencia energética, eficiencia hídrica, calidad ambiental interior, gestión de residuos, automatización y materiales sostenibles. El análisis de estos indicadores podría servir para esquemas de gestión hospitalaria orientados a la eficiencia operativa de las*

UCIs. Buscando garantizar una transición viable hacia entornos críticos más sostenibles.

Palabras claves— *Sostenibilidad, hospitales, UCIs, indicadores, eficiencia energética, tecnología, medio ambiente.*

INTRODUCCIÓN

Las Unidades de Cuidados Intensivos (UCIs) son áreas hospitalarias críticas con un alto impacto ambiental debido a su intensiva demanda de energía, agua y materiales desechables. Esta realidad convierte a las UCIs en uno de los entornos más exigentes dentro de la infraestructura hospitalaria moderna, teniendo en cuenta aspectos técnico y operativo [1]. Debido a esto, las UCIs se caracterizan por tener un alto uso de energía por m² en comparación con otras áreas del hospital. Estas unidades muestran un gasto superior al promedio hospitalario [2]. Y la atención médica en el mundo representa el 4.4% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero [3]. Además, la mayor parte de este gasto se genera en el entorno de cuidados intensivos [3]. Generando una carga ambiental que incluye un alto uso de agua y la alta generación de residuos clínicos debido al uso de insumos desechables [4].

Como resultado, existen parámetros para la evaluación de distintos indicadores de sostenibilidad en infraestructura hospitalaria. Certificaciones como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) para Salud, EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) y el Estándar de Construcción WELL (WELL Building Standard), demuestran ser adecuadas para estas mediciones [5]. Sin embargo, estas certificaciones no cuentan con indicadores específicos para áreas

críticas como UCIs. De modo que, se genera un vacío metodológico para evaluar su sostenibilidad de forma precisa y replicable. Por esta razón, la ejecución de diversas iniciativas demuestra la viabilidad de aplicar iniciativas sostenibles en las UCIs [6].

Ahora bien, la sostenibilidad en las salas de UCIs debe ser tomada en cuenta desde el diseño de la infraestructura, la gestión operativa y la implementación de las tecnologías. Esto también incluye materiales y acabados bajos en COV (compuestos orgánicos volátiles), aislamiento, zonificación y digitalización [7]. Las herramientas disponibles actualmente solo toman en cuenta el edificio completo y no hay indicadores que permitan calificar el rendimiento ambiental de los elementos dentro de las UCI [8]. Por lo tanto, se debe identificar un conjunto de indicadores para determinar la sostenibilidad de las UCIs a niveles técnicos, operativos y ambientales [9].

Este documento tiene como objetivo analizar un conjunto de indicadores de sostenibilidad compatibles con las prácticas clínicas, operativas y técnicas aplicables a UCIs, permitiendo incorporar modelos de gestión y eficiencia hospitalaria, garantizando la seguridad del paciente y el desempeño de los equipos biomédicos.

Dentro de este orden de ideas, se plantea la siguiente interrogante ¿El análisis de modelos internacionales de sostenibilidad permite determinar indicadores adaptables a UCIs?.

MARCO TEÓRICO.

2.1 Unidad de Cuidados Intensivos (UCI).

Una UCI es un sistema organizado para la atención de pacientes críticos que necesitan asistencia médica y enfermería intensiva especializada [10]. También una mayor capacidad de monitoreo y múltiples modalidades de soporte fisiológico. Con esto, se busca mantener la vida del paciente durante un período en el que se encuentra en estado crítico. Por esta razón, la función de las UCIs toma un papel muy importante dentro de las estructuras hospitalarias. Esto se debe a que proporcionan soporte vital avanzado y continuo a pacientes en un estado delicado. Es por ello, que las UCIs se diseñan con la tarea de mantener la estabilidad fisiológica mediante la constante observación y la aplicación de múltiples terapias a los pacientes. Las terapias más utilizadas en estas unidades serían la ventilación mecánica, aplicación de sedantes, utilización

del agua y monitoreo hemodinámico [11]. Dicho esto, distintas investigaciones han demostrado que la atención y aplicación oportuna de estas terapias reduce notablemente la muerte del paciente, particularmente en casos de sepsis, síndrome de dificultad respiratoria aguda y shock multiorgánico [12].

En este sentido, una gestión adecuada de las UCIs involucra la toma de decisiones inmediatas y basada en evidencia científica. También el apoyo de una infraestructura que permita la intervención y ejecución del personal médico en acciones rápidas y precisas. Tomando en cuenta que estas infraestructuras físicas también deben atender criterios estrictos de bioseguridad, aislamiento, control ambiental. Todo esto, permite una intervención médica eficiente ante cualquier descompensación fisiológica [13]. Cabe resaltar, que estas unidades funcionan con un equipo de personas altamente especializadas en esta área. Estos equipos son conformados por intensivistas, enfermería crítica, terapeutas respiratorios, farmacólogos clínicos y personal de soporte técnico [14]. Ahora bien, para orientar la atención y evaluación del progreso en el paciente, se utilizan herramientas estandarizadas. Estas herramientas son APACHE II (Acute Physiology and Chronic Health Evaluation II), este es un método de puntuación que estima la mortalidad hospitalaria a partir de variables fisiológicas, edad y comorbilidades. Por otro lado, encontramos el SOFA (Sequential Organ Failure Assessment), el cual se define como una escala que cuenta el nivel de disfunción orgánica en seis sistemas clave, facilitando el seguimiento del estado crítico del paciente [15].

Cabe considerar, que el funcionamiento de las UCIs depende de dispositivos biomédicos altamente especializados, estos permiten el monitoreo, soporte y tratamiento. De este modo, los equipos garantizan la estabilidad fisiológica del paciente. También deben operar de forma ininterrumpida, lo cual, conlleva a un elevado consumo de energía y mantenimiento [16]. Entre los dispositivos que más destacan encontramos los ventiladores mecánicos, esenciales para pacientes con insuficiencia respiratoria. Por otra parte, están los monitores multiparamétricos, que permiten observar continuamente datos como frecuencia cardíaca, presión arterial, saturación de oxígeno y temperatura. Estos equipos se caracterizan por ser los más utilizados dentro de una UCI. Este uso provoca un constante gasto energético, además de requerimientos específicos de mantenimiento preventivo y respaldo eléctrico (UPS) [16]. Al mismo tiempo, existen otros equipos como bombas de infusión, capnógrafos, sistemas de hemodiálisis y

monitores de presión invasiva. Por esto, el uso contante de estos equipos requiere estar unidos a sistemas de recolección de información [17]. Especialmente los que integran historiales clínicos electrónicos, alarmas inteligentes y plataformas de análisis de datos biomédicos [18]. Esta integración, si bien mejora la continuidad del cuidado, demanda inversiones adicionales en infraestructura digital y seguridad informática.

Un aspecto crucial en la sostenibilidad del equipamiento biomédico es el mantenimiento preventivo y correctivo. Se ha demostrado que una mala gestión en el mantenimiento puede generar fallas críticas, interrupción del servicio e incluso riesgos para la seguridad del paciente [19]. En otras palabras, la falta de un plan para el mantenimiento de los equipos aumenta el uso de recursos y reduce la vida útil de los dispositivos biomédicos. Es decir, genera un impacto económico y ambiental que debe tomarse en consideración.

Con relación a lo anterior, tomamos en cuenta que el número de equipos por cama en una UCI requiere un plan detallado del espacio físico. También de los sistemas de energía, gases medicinales, HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) y respaldo. Este nivel de complejidad transforma a las UCIs en espacios de alta especialización técnica y operativa. En algunos estudios, se calcula que cada UCI puede utilizar entre 20 y 40 puntos de conexión eléctrica, datos, aire comprimido y vacío [20]. Este nivel de complejidad transforma a cada UCI de alta especialidad técnica. Con esto, garantizamos la eficiencia clínica y sostenibilidad ambiental. Cabe resaltar, el cambio a modelos hospitalarios inteligentes, algunas instituciones están incorporando dispositivos IoT (Internet of Things) en sus UCIs. Esta tecnología permite el monitoreo remoto, predicción de fallos y mantenimiento programados. Aunque debemos mencionar, que esta tecnología ofrece ventajas operativas, también incrementa el consumo energético. Lo que representa desafíos en ciberseguridad, por esta razón debemos tomar su adopción de una manera bien planificada [21].

Con relación a lo anterior, entendemos que las UCIs no se definen solo por su equipamiento, sino también por su modelo operativo. Esto incluye la implementación de protocolos estandarizados, sistemas de triage dinámico, personal asistencial y auditorías clínicas que aseguran la calidad en la atención [22]. Adicionalmente, son áreas con una alta demanda energética y generación de residuos infecciosos.

Como resultado de lo antes expuesto, se tenemos en UCI una alta demanda de recursos y generación de residuos.

Esto se traduce en un consumo energético considerable, estimado entre 50 y 120 kWh por cama por día, dependiendo del nivel tecnológico y las condiciones del entorno [16]. De igual forma, también obtenemos un intensivo uso del agua. Esta se emplea en procesos de limpieza y esterilización (como autoclaves), humidificación activa y climatización. En hospitales europeos, se ha documentado un consumo de más de 1 300 litros diarios por autoclave, lo que demuestra la urgencia de mejorar la eficiencia de estos sistemas [23].

En cuanto a residuos, las UCIs generan un volumen elevado de residuos debido al uso habitual de insumos desechables. Esto nos muestra una cantidad significativa, que se clasificada como residuos infecciosos. Es decir, se encarece y complica su tratamiento [24]. Este volumen se incrementa por el uso de consumibles plásticos de un solo uso como guantes, sondas, paquetes estériles y sistemas de ventilación. Además, estudios recientes han estimado que la huella ambiental de una cama UCI puede alcanzar hasta 138 kg de CO₂ por día. Este apartado incluye emisiones relacionadas al uso de electricidad, gases anestésicos, calefacción y manejo de residuos. También se reporta la generación de 7.1 kg de residuos sólidos por cama por día, siendo las UCIs el área hospitalaria con mayor impacto ambiental por unidad funcional [25].

Esta perspectiva, nos lleva a la conclusión de la necesidad de diseñar indicadores de sostenibilidad específicos para evaluar el desempeño ambiental de las UCI. De modo que, estos deben ser orientados en términos de consumo energético e hídrico, generación de residuos, y emisiones. Este tipo de indicadores son claves para encaminar nuevas políticas institucionales. Estas políticas deben ir dirigidas hacia un modelo de atención que combine eficacia clínica con responsabilidad ambiental. Esto convierte a las UCIs en un área clave para la evaluación de indicadores de sostenibilidad en el entorno hospitalario [26].

2.2. El concepto de sostenibilidad en el sector salud.

La definición de la palabra sostenibilidad nace oficialmente en el Informe Brundtland 1987. Este fue redactado por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas. En este informe se define el desarrollo sostenible como "aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" [27]. Esta definición ha hecho que se formulen políticas ambientales y sociales en múltiples sectores, incluyendo el sector salud.

Sin embargo, investigaciones recientes, como la desarrollada por Purvis, Mao y Robinson 2019, nos avisan sobre la necesidad de renovar el marco conceptual de la sostenibilidad. En su evaluación crítica, los autores nos indican que el modelo está basado en tres pilares (ambiental, social y económico) [28]. Estos han sido ampliamente aceptados, debido a la creciente complejidad de los desafíos globales y la conexión de sus dimensiones, especialmente cuando se aplica a sistemas complejos como los hospitales.

La sostenibilidad tiene tres pilares que son abordados de manera detallada por Purvis, quien argumenta que debe entenderse como subsistemas interrelacionados en lugar de entidades independientes[28]. La eficiencia energética (ambiental) puede llevar a ahorros económicos, y estos pueden reinvertirse en mejores condiciones laborales (social). Por último, el aspecto económico abarca la viabilidad financiera de la institución y la eficiencia operativa.

En el sector salud, las UCIs representan una de las áreas más desafiantes para la implementación de estrategias sostenibles. Por lo que los hospitales tienden a tener altos gastos de energía, agua y materiales. Lo cual genera residuos peligrosos y requieren un tratamiento altamente especializado. En pocas palabras, la sostenibilidad aplicada a salud involucra diseño, operación y mantenimiento que disminuyan el impacto ambiental sin arriesgar la bioseguridad ni la eficiencia del servicio [29].

En este sentido, los 3 pilares de la sostenibilidad deben adaptarse a objetivos concretos en salud. Estos deben ser la eficiencia energética y calidad del aire (ambiental), atención equitativa y condiciones laborales dignas (social), y la disminución de costos operativos con inversión inteligente (económica). Esta cobra mayor importancia en áreas críticas como UCIs. Por esto, debemos encontrar un equilibrio entre innovación tecnológica y sostenibilidad, la cual representa un gran desafío [28].

2.2.1 Pilar ambiental: eficiencia energética y calidad del aire en UCI.

El pilar ambiental de la sostenibilidad busca reducir el impacto ecológico de las infraestructuras hospitalarias. Debido a esto, se busca implementar estrategias de eficiencia energética, manejo de residuos, control ambiental y reducción de emisiones. Es por esto, que las UCIs se encuentran con un gran reto, debido a su alta carga tecnológica y estrictas condiciones de

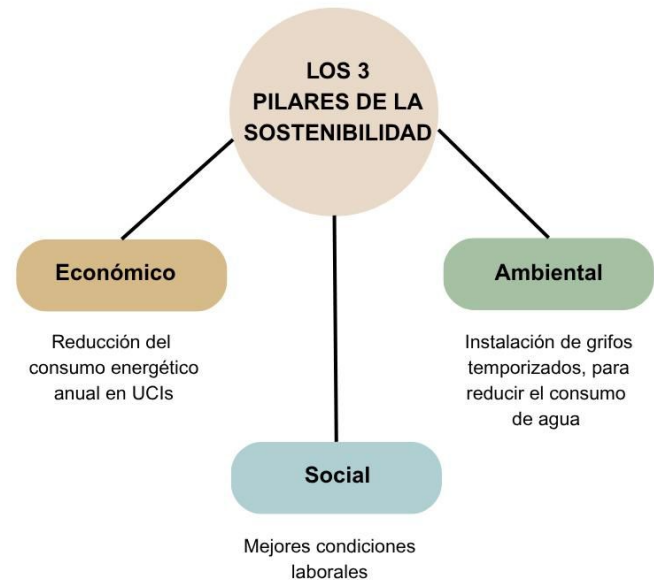


Figura 1. Se observa los 3 pilares de la sostenibilidad. Se observa un ejemplo de cómo son aplicables a las UCIs. Creado por los autores.

bioseguridad. Por ejemplo, el consumo energético por una cama en UCI puede superar los 10.000 kWh/año. Esta cifra sería hasta cuatro veces más que el de otras áreas del hospital [30]. Dentro de este marco, la modernización de los sistemas HVAC en unidades críticas hospitalarias representa una estrategia clave para alcanzar sostenibilidad ambiental [31]. La incorporación de tecnologías como la recuperación térmica y la irradiación germicida ultravioleta (UVGI), junto con filtros HEPA de alta eficiencia, ha mostrado eficacia tanto en la contención de patógenos en el aire como en la reducción del consumo energético asociado a la climatización intensiva [32], [33]. Estas soluciones resultan especialmente relevantes en UCIs, donde la recirculación de aire y los controles de presión son esenciales para garantizar bioseguridad.

Por otro lado, la integración de sistemas automatizados de gestión del edificio (BMS Building Management System) permite un control preciso de variables ambientales como la humedad, temperatura, ventilación y diferencial de presión entre áreas limpias y sucias [33]. Esta automatización no solo optimiza el uso energético al ajustar los sistemas según la demanda real, sino que también mejora las condiciones térmicas y funcionales del entorno clínico [33]. De manera complementaria, la implementación de luminarias LED inteligentes, dotadas de sensores de ocupación y control de intensidad, ha demostrado ser eficaz para reducir significativamente el consumo eléctrico sin comprometer los requerimientos visuales de los equipos médicos [32].

2.1.2 Pilar social: atención equitativa y condiciones laborales dignas en UCI.

La sostenibilidad desde un punto de vista social en salud se compromete a garantizar el bienestar físico, emocional y profesional de los trabajadores como de los pacientes. En el contexto de las UCIs, el personal de salud se enfrenta a decisiones complejas bajo presión extrema. En efecto, estas personas pasan jornadas extensas, cansancio físico, y sobrecarga emocional. Todos estos factores se asocian con burnout y errores clínicos, tal como pudimos observar en la pandemia de COVID-19 [34]. En cambio, la implementación de actividades ha demostrado mejorar la satisfacción laboral y reducir el ausentismo [35]. Estas actividades son pausas activas, turnos rotativos racionales, apoyo psicológico institucional y espacios ergonómicos dentro de las UCI. Por esta razón, la calidad de vida y laboral del personal de salud es un componente para tomar en cuenta. Desde la perspectiva del paciente, la sostenibilidad social protege que se dé una atención equitativa que no vea edad, etnia o condición económica. En este sentido, la integración de políticas de acceso universal ha sido esencial para garantizar la atención justa de los pacientes en UCI [36], [37].

2.2.3 Pilar económico: eficiencia operativa e inversión inteligente en UCI.

El pilar económico de la sostenibilidad en salud se basa en optimizar los recursos disponibles. Ante todo, garantizando la continuidad de servicios sin comprometer su calidad. Las UCIs, por ser áreas con un costo operativo alto, representan un especial desafío para la viabilidad financiera del hospital. Ahora bien, aplicar análisis de ciclo de vida (LCA Life Cycle Assessment) a las decisiones de compra puede ayudar a las finanzas del hospital. Esto nos permite evaluar no solo el costo inicial del equipo, sino su impacto energético, mantenimiento y vida útil [37]. No obstante, en escenarios de recursos limitados existen estrategias viables para la sostenibilidad. Estas estrategias van desde adquisiciones compartidas, contratos de mantenimiento preventivo hasta financiación verde pueden ofrecer solución a estos hospitales [33]. Además, estudios demuestran que la digitalización de procesos en UCIs puede reducir hasta un 20% los costos operativos anuales [38]. También el uso de historiales clínicos electrónicos, gestión automatizada de inventario y telemonitorización. Estas herramientas reducen errores médicos y optimizan la asignación de camas, logrando un impacto directo en la eficiencia del sistema.

Una vez analizados los 3 pilares de la sostenibilidad, iremos a estudiar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que podríamos aplicar al sector salud. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, la cual fue adoptada por la Asamblea General de las Naciones Unidas, establece un marco global mediante 17 ODS. Varios de estos influyen directamente en la transformación del sector salud. Por esta razón, mencionaremos algunos de los objetivos más influyentes en el sector salud.

El ODS 3 es uno de los objetivos fundamentados en la "salud y bienestar de las personas [39]. Este constituye un pilar fundamental para transformar el sistema de salud, al asegurar una vida sana y fomentar el bienestar humano. En este objetivo se impulsan reformas para fortalecer la protección sanitaria del mundo y disminuir las diferencias cada uno de esto en el acceso a servicios médicos. Está demostrado que emplear charlas dedicadas a la prevención, el diagnóstico oportuno y la atención continua, están asociadas a mejores resultados poblacionales, disminución de la mortalidad y aumento de la esperanza de vida [40].

Además, la ODS 3 busca encontrar factores determinantes para el acceso a la salud. Estos pueden ser la pobreza, educación y vivienda. Vemos que estos factores son fundamentales para minimizar las diferencias al adquirir atención clínica en la población más vulnerables [41]. En este sentido, se promueve una perspectiva de salud integral y equitativa, que requiere coordinación y participación comunitaria.

En UCIs donde la atención médica define la supervivencia, este objetivo se vuelve aún más crítico. Estudios recientes demuestran que la implementación de protocolos estandarizados, capacitación continua y tecnología adecuada en UCIs mejora significativamente los resultados clínicos [42]. En este sentido, crear políticas hospitalarias con la ODS 3 eleva los estándares de atención, promueve sistemas de salud más justos, eficientes y centrados en las personas.

Seguidamente, vemos la ODS 6, tiene como objetivo principal "garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos [43]. Este objetivo representa la ausencia de sistemas eficientes de agua y saneamiento en las UCIs. Por consiguiente, se detecta una amenaza crítica para la seguridad del paciente y la calidad del entorno clínico. Estas unidades al encontrarse en espacios cerrados requieren un suministro continuo de agua limpia y rutinas de higiene estrictas. Estudios revisan el ambiente de patógenos como Legionella pneumophila, Mycobacterium avium y Pseudomonas aeruginosa en biofilms de tuberías hospitalarias y

humidificadores relacionándolas con infecciones en pacientes inmuno comprometidos [44]. Por otro lado, investigaciones en UCIs han demostrado que los pacientes en estado crítico son altamente vulnerables a infecciones nosocomiales debido a su sistema inmunológico debilitado [45]. La falta de infraestructura hídrica adecuada agrava aún el porcentaje de defunciones en este tipo de unidades. Frente a esta situación, se vuelve indispensable integrar criterios de sostenibilidad hídrica en el diseño y operación de las UCIs.

La ODS 7, tiene como objetivo la “energía asequible y no contaminante”. Esta es fundamental para garantizar la seguridad clínica y la sostenibilidad del sistema de salud. En las UCIs, el suministro eléctrico ininterrumpido es vital para que los equipos funciones de la manera correcta. Este suministro ininterrumpido alimenta equipos como ventiladores, monitores y sistemas de climatización, etc. Los breves cortes de energía pueden causar pérdida de monitoreo, comunicación, asistencias, poniendo en riesgo la vida de los pacientes [46]. Debido a su consumo energético, las UCIs generan una huella de carbono muy alta. En especial si mencionamos a por sistemas de climatización, dispositivos de soporte vital y equipos biomédicos. Los equipos biomédicos son el principal causante del consumo energético en las UCIs [47]. Por otro lado, la instalación de microredes fotovoltaicas ha demostrado ser una buena estrategia para el soporte eléctrico de los equipos durante cortes prolongados. Este tipo de infraestructura puede garantizar la operación sostenida y reducir significativamente los costos y emisiones en las UCIs [48].

El ODS 9, su objetivo es "Construir el desarrollo de infraestructuras resilientes y sostenibles mediante innovación tecnológica". En el contexto de las UCIs, esto implica adoptar diseños modulares, automatización energética y sistemas inteligentes. Estos sistemas deben ser capaces de ajustar ventilación, temperatura y recursos en función de la ocupación. Estas estrategias mejoran la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta frente a crisis sanitarias [49], [50].

En último lugar, el ODS 13, “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos”. Asimismo, impulsa medidas urgentes para reducir las emisiones del sector salud en UCIs. De hecho, esto se traduce en estrategias como el uso de energías renovables, la evaluación del ciclo de vida (LCA) y la implementación del enfoque “Green ICU”, que promueve intervenciones operativas sostenibles sin comprometer la atención clínica. [50]. [51]. [52].

La inclusión detallada de los ODS 3, 6, 7, 9 y 13 en el manuscrito responde a su articulación directa con las dimensiones operativas y técnicas evaluadas en el estudio. Cada uno de estos objetivos se vincula con criterios concretos que afectan la sostenibilidad de las UCI, y sirven como marco orientador para definir y estructurar los indicadores propuestos.

En particular:

El ODS 3 fundamenta la dimensión clínica y de equidad en el acceso, sirviendo como base para indicadores relacionados con calidad asistencial, cobertura y bienestar del paciente crítico.

El ODS 6 está directamente vinculado a los indicadores sobre gestión de agua, saneamiento hospitalario y control de infecciones, especialmente en entornos cerrados como las UCIs.



Figura 2. En esta imagen se muestran los ODS aplicables al sector salud. [53]

El ODS 7 se articula con métricas de eficiencia energética, consumo eléctrico de equipos biomédicos, respaldo energético y uso de energías renovables.

Por otro lado, el ODS 9 orienta los indicadores sobre innovación tecnológica, automatización, integración de sistemas BMS y diseño resiliente de infraestructuras críticas.

El ODS 13 sustenta las evaluaciones sobre huella de carbono, emisiones asociadas a consumibles clínicos y estrategias de mitigación ambiental en áreas de alta complejidad.

Así, esta sección no constituye una revisión conceptual aislada, sino una fundamentación estratégica que orienta la selección y justificación de los indicadores aplicados a las UCIs. Su desarrollo profundo permite vincular las metas globales de sostenibilidad con los parámetros técnicos medibles propuestos en este estudio.

A continuación, se presentará la TABLA I. En esta se muestra los ODS y su aplicación en el contexto hospitalario (aplicables a UCI). Asimismo, se seleccionaron ODS directamente vinculados con la sostenibilidad ambiental, la eficiencia energética, el acceso a recursos vitales y la innovación tecnológica en salud.

TABLA I. OBJETIVOS PARA EL DESARROLLO DE LA SOSTENIBILIDAD(ODS) APLICABLES AL SECTOR SALUD.

ODS	Nombre	Objetivo	Ref.
ODS 3	Salud y bienestar	Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos.	[53] [39]
ODS 6	Agua limpia y saneamiento	Garantizar la disponibilidad de agua, su gestión para el saneamiento y manejo sostenible.	[53] [43]
ODS 7	Energía asequible y no contaminante	Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.	[53] [54]
ODS 9	Industria, innovación e infraestructura	Promueve infraestructuras con innovación tecnológica	[53] [49]
ODS 13	Acción por el clima	Adoptar medidas con urgencias para combatir el cambio climático y sus efectos.	[53] [55]

2.3. Impacto ambiental del sector salud y las UCIs.

La tarea principal del sector salud es preservar la vida y el bienestar humano. Según Health Care Without Harm (HCWH), el sector salud es responsable de aproximadamente el 4.4 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Estas emisiones son el equivalente a 2 giga toneladas de CO₂ anualmente [3]. Por lo tanto, la huella de carbono que deja el sector salud es equivalente a la intensidad de servicios prestados y al nivel de complejidad de las instalaciones [3]. Estas emisiones tienen tres indicadores principales, el consumo energético, la cadena de suministro de bienes médicos y el transporte asociado al sistema sanitario.

Por consiguiente, las UCIs se distinguen de otras áreas por su funcionamiento continuo, alto equipamiento tecnológico y condiciones ambientales controladas. La combinación de estos factores transforma a las UCIs en una de las áreas con una alta demanda de energía por metro cuadrado en los hospitales. De acuerdo con un informe del BID sobre edificaciones verdes, el consumo energético de áreas críticas puede estar entre 200 y 700 kWh/m²/año [9]. Esto se debe a la operación continua de sistemas especializados y equipamiento de alta demanda eléctrica[9]. En vista de ello, depende de factores como el clima, la tecnología utilizada, y el nivel de automatización. Este elevado consumo se debe principalmente a los sistemas de climatización (HVAC), iluminación especializada, ventiladores mecánicos, monitores y sistemas de respaldo energético que operan 24/7 [9].

2.3.1 Problemas del diseño hospitalario tradicional desde la sostenibilidad.

Los hospitales actuales son infraestructuras altamente complejas. Estas están compuestas por componentes estructurales, arquitectónicos y electromecánicos. Si lo observamos desde un punto de vista físico, un hospital se compone de cimentación, estructuras, muros divisorios, cubiertas y sistemas de cerraduras. Estas piezas son fundamentales para el funcionamiento del edificio y soportan los sistemas técnicos y operativos [7]. En este sentido, existen estudios que hablan de la implementación de sistemas BIM (Building Information Modeling) permite simular algunos parámetros antes de su construcción. Estos parámetros son el rendimiento energético, iluminación natural y ventilación pasiva. Los datos de esta simulación han demostrado reducir la demanda HVAC en 15 % al optimizar la orientación y geometría del edificio durante su diseño [56].

No obstante, vemos que el diseño hospitalario tradicional prioriza la funcionalidad clínica inmediata por encima del desempeño ambiental. Muchos hospitales fueron construidos bajo modelos lineales de consumo, materiales no sostenibles, sistemas sobredimensionados y una baja valoración de la eficiencia energética o la baja utilización de recursos naturales. Sin embargo, implementar sistemas de control inteligente dirigidos al confort del paciente, reducen entre 20 % y 30 % de la demanda energética en HVAC. En efecto, este sistema demuestra que la sostenibilidad y la operación médica eficiente pueden trabajar de la mano [57], [58].

El informe del United Nations Environment Programme (UNEP) resalta que gran parte de las instalaciones hospitalarias que existen, no están diseñadas para operar de manera eficiente. Por lo tanto, se produce una sobrecarga en sistemas técnicos, gastos excesivos en operación, mantenimiento y resistencia al cambio tecnológico [8]. Ahora bien, varios hospitales con iniciativas verdes han evidenciado mejoras en el consumo de recursos en el hospital. Como resultado se vio una reducción de hasta un 40 % en el gasto de electricidad y calefacción. Sobre todo, mejorando la salud y comodidad del paciente [59], [60].

Entre los principales problemas del diseño hospitalario tradicional se identifican:

- Falta de zonificación.
- Iluminación artificial poco eficiente.
- Sistemas HVAC poco flexibles y de alta demanda energética.
- Falta de ventilación natural y aislamiento térmico deficiente.
- Uso excesivo de materiales contaminantes.

Estos aspectos refuerzan la urgencia de reformular los criterios de diseño, renovación y operación hospitalaria bajo un enfoque sostenible, resiliente y centrado en la salud ambiental.

A este respecto, estrategias como la zonificación adaptativa basada en sensores de ocupación, fachadas con recuperadores de calor y muros trombe han sido incorporadas en entornos clínicos modernos, evidenciando una disminución en consumos de climatización de hasta un 25 % [60], [61].

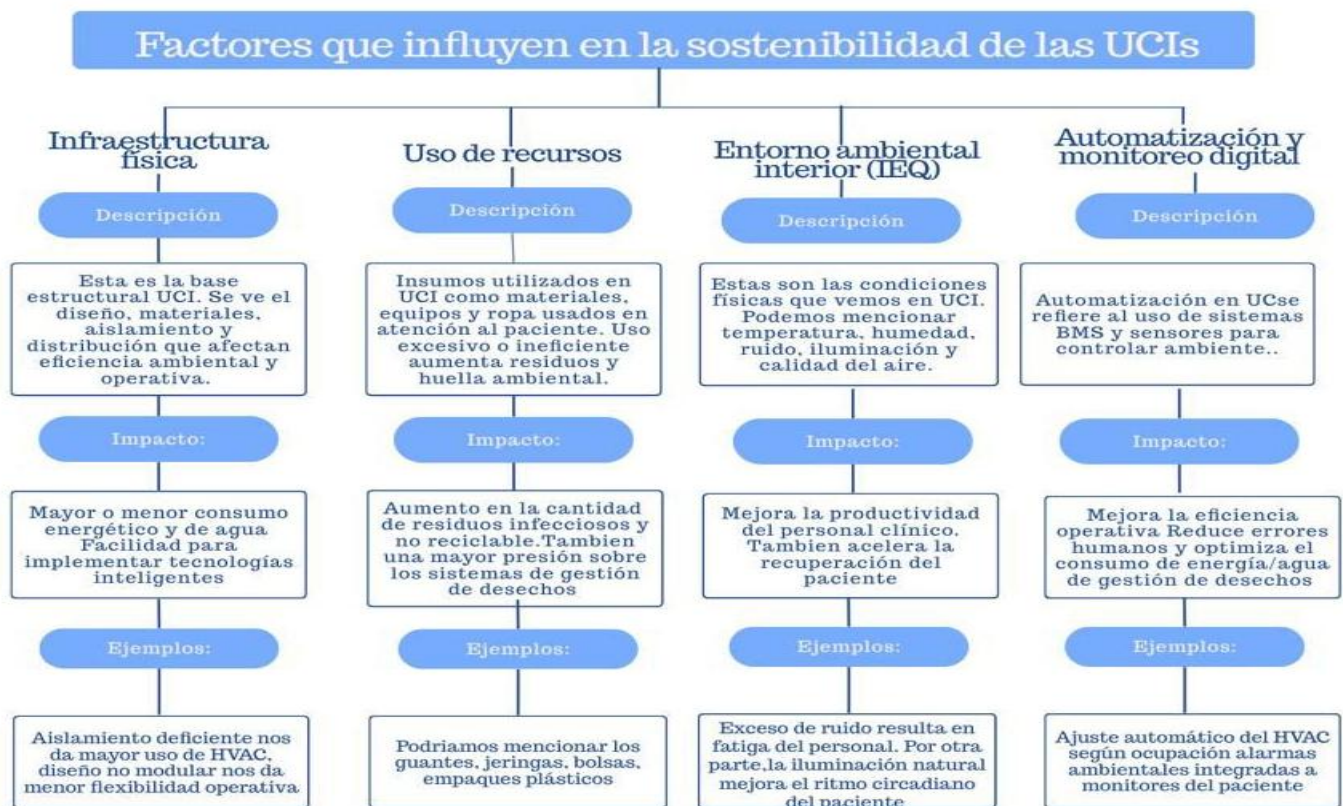


Figura 3. Factores que influyen en la sostenibilidad de las UCIs. Elaborada por los autores.

2.4 Comparación del impacto ambiental entre áreas hospitalarias críticas y no críticas.

Las diferencias de consumo y generación de los desechos entre áreas hospitalarias son evidentes. Las áreas críticas como las UCIs, quirófanos y salas de emergencia presentan un impacto ambiental mucho mayor que las áreas no críticas (consultorios, administración, salas de espera).

Por ejemplo, el consumo energético en UCIs podría llegar a ser tres veces más, tomando en cuenta que la generación de residuos infecciosos puede duplicarse o triplicarse [9]. Esta diferencia justifica la necesidad de desarrollar indicadores diferenciados y estrategias de sostenibilidad específicas para cada área crítica del hospital.

Por otra parte, el manejo de los residuos hospitalarios es uno de los mayores desafíos ambientales en el sector salud. A nivel mundial, se estima que un 15 % de los residuos generados en hospitales son peligrosos, incluyendo materiales infecciosos, punzocortantes, químicos y radioactivos [62]. Las UCIs son responsables de una significativa parte de estos residuos, ya que maneja pacientes críticos con múltiples dispositivos invasivos.

Un manejo inadecuado puede producir riesgos sanitarios, contaminación del suelo y del agua. También la emisión de compuestos tóxicos al medio ambiente durante los procesos de incineración. La OMS recomienda implementar estrategias de reducción en origen, separación en sitio, y sustitución progresiva de insumos por materiales biodegradables o reutilizables [62]. Por ejemplo, se estudió un artículo en el cual se analizaron 43 hospitales de Irán. Este artículo mostró el costo promedio de la gestión de residuos infecciosos por área. Como resultado, se vio que el precio en hospitales autosostenibles fue de USD \$0.30 por kg, frente a USD \$2.36 por kg en hospitales no sostenibles [63]. La diferencia entre hospitales es 8 veces más, lo que genera una carga financiera y ambiental por área crítica frente a las no críticas. También se observó que los principales generadores de residuos peligrosos dentro de los hospitales fueron los anestesiólogos (5.96 kg/día/cama). Seguidamente, las UCIs (3.37 kg/día/cama), y endoscopia (~3.09 kg/día/cama). En contraparte, las otras áreas registraron menos de 1 kg/día por cama [63]. En otro artículo en Europa, se calculó que solo del 1 al 3 % de los residuos son infecciosos. Como consecuencia, su gestión puede costar entre 5 y 10 veces más que los residuos convencionales. Esto aumenta la

importancia de su adecuada gestión y tratamiento en áreas críticas [64].

Finalmente, prácticas avanzadas como la reprocesamiento de dispositivos de un solo uso (SUD) han logrado reducir la cantidad de residuos en más de 90 %. Por ende, se logró evitar el envío de más de 20 millones de libras de residuos del vertedero utilizando esta estrategia.[65].

2.5 Características de la infraestructura hospitalaria.

2.5.1 Consumo de energía, agua y materiales.

Las demandas de recursos en hospitales son extremadamente altas. De acuerdo con el informe Greening Health Systems, un hospital común puede consumir hasta 3 veces más energía que un edificio comercial estándar [7]. Esto se debe al uso continuo de equipos médicos, iluminación, sistemas HVAC especializados y procesos hospitalarios complejos [7].

Sin embargo, el impacto ambiental de las UCIs no se limita al consumo energético. Estas unidades también presentan un alto uso de recursos hídricos y materiales desechables. El gasto hídrico promedio puede sobrepasar los 400 litros/paciente/día. Principalmente, considerando procedimientos médicos, lavado de manos, procesos de limpieza, higiene hospitalaria, y sistemas de humidificación [9].

El uso diario de insumos desechables en UCI contribuye directamente a la alta generación de residuos clínicos. Entre los más comunes vemos las jeringas, guantes, sondas, bolsas intravenosas y dispositivos respiratorios. La mayoría de estos materiales son plásticos no reciclables, los cuales generan residuos que requieren tratamientos especiales (como incineración), lo que aumenta aún más la huella ecológica del sector salud [3].

El uso constante de estos componentes no solo genera una considerable huella ambiental, también implica una alta dependencia de insumos desechables. Esto proviene de cadenas de suministro globales, lo cual representa un desafío particular para aquellos países con capacidades limitadas de producción local.

2.5.2 Comparación entre UCIs y otras áreas del hospital.

La distribución del espacio y funcionalidad de un hospital genera distintos perfiles de consumo e impacto ambiental. Las áreas críticas, como UCIs, salas de cirugía, laboratorios y urgencias, nos muestran una gran demanda energética y de recursos. Estas son

notablemente superiores a las de áreas más comunes, como consultorios, salas de espera o administración.

En el caso de un consultorio, este se puede operar con iluminación estándar y ventilación natural.

Una UCI necesita sistemas HVAC, control de presión positiva, iluminación especializada, suministro continuo de energía, gases medicinales, y monitoreo ambiental constante. Esta área nos muestra una mayor generación de residuos infecciosos y requieren de un modelo más estricto de bioseguridad y mantenimiento técnico [62]. Estas diferencias nos demuestran la obligación de diferenciar los indicadores y estrategias de sostenibilidad por áreas en el hospital.

2.6 Indicadores específicos para evaluar la sostenibilidad en UCI.

La evaluación objetiva de la sostenibilidad en UCIs requiere el uso de indicadores específicos, ajustados a sus condiciones clínicas, técnicas y operativas. Estos indicadores deben ser medibles, verificables y comparables para facilitar tanto el diseño como la operación sostenible.

Este estudio clasifica los indicadores en seis parámetros de medidas técnicas, fundamentadas en literatura científica, certificaciones ambientales (LEED, EDGE, GGHH) y casos hospitalarios documentados a nivel internacional. Cada parámetro de medida refleja un aspecto crítico del desempeño ambiental en UCIs.

En este sentido, la eficiencia energética se valora mediante el consumo energético por cama crítica (kWh/cama/mes), en el cual se integra el uso constante de ventiladores, monitores, iluminación, HVAC y sistemas de respaldo. Se complementa con el índice de intensidad energética, que se relaciona con el consumo total de la carga clínica diaria. Además, se analiza el porcentaje de energía renovable utilizada en aplicaciones no críticas, como iluminación o calentamiento de agua [66], [67].

Asimismo, la eficiencia del agua se evalúa a través del uso de dispositivos de bajo consumo, como grifería temporizada, sensores infrarrojos y sanitarios de doble descarga. Se incorpora también la presencia de sistemas de reutilización de aguas grises para fines secundarios, como riego o descarga en zonas adyacentes [9].

Se observó que la calidad ambiental interior (IEQ) incluye parámetros como temperatura promedio (20–24 °C), humedad relativa (30–60 %) y concentración de CO₂ inferior a 1 000 ppm, esto concuerda con la normativa ASHRAE 170 [68]. También se consideran los niveles de COV presentes en los acabados, la intensidad de ruido clínico percibido en dB, y el porcentaje de iluminación natural disponible en las áreas útiles [69], [62].

En este caso, la gestión de residuos se mide por la proporción de residuos infecciosos generados respecto al total. También se mide el porcentaje de separación en el sitio de origen. Se incluye el volumen mensual de residuos reciclables recuperados y el porcentaje de insumos reutilizables o biodegradables adquiridos institucionalmente [70].

Por último, la automatización y monitoreo digital considera el porcentaje de variables ambientales que están automatizadas mediante sistemas BMS. Se valora el tiempo promedio de respuesta ante desviaciones críticas, la integración con plataformas clínicas de monitoreo y la existencia de trazabilidad histórica de condiciones ambientales relevantes [71].

Finalmente, los materiales sostenibles se analizan con base en la proporción de superficies cubiertas con materiales certificados o libres de COV. Se contempla el porcentaje de mobiliario clínico con atributos ecológicos, la incorporación de materiales con baja energía incorporada y la presencia de superficies antimicrobianas con alta durabilidad [7], [72].

A partir de estos indicadores, se desarrollará la TABLA II, la cual es una tabla comparativa que sintetiza su

TABLA II. MÉTRICAS CUANTITATIVAS POR DIMENSIÓN Y ÁREA.

Dimensión	Ud. de medida	UCI	Urg.	Lab.	Ra. d.	Admi n.	Ref.
Consumo energético	kWh/m ² · año	2200	1500	800	1200	250	[2], [73], [74]
Uso de agua	L/paciente · día	300	50	100	80	30	[67], [75]
Generación de residuos	kg/paciente · día	7.1	5.5	1.5	1.0	0.5	[2], [76]

aplicabilidad, unidades de medida y evidencia internacional correspondiente.

CERTIFICACIONES Y MARCOS NORMATIVOS INTERNACIONALES.

El avance hacia una infraestructura hospitalaria sostenible ha promovido el desarrollo de certificaciones ambientales dirigidas al diseño, construcción y operación de centros de salud. Entre las principales herramientas se encuentran LEED for Healthcare, EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies), WELL Building Standard y la iniciativa Global Green and Healthy Hospitals (GGHH).

Estas certificaciones permiten evaluar y mejorar el desempeño ambiental de los hospitales mediante sistemas estandarizados. Su implementación facilita la obtención de indicadores cuantificables y adaptables, ajustados a diversos contextos geográficos y capacidades institucionales.

LEED v4 for Healthcare, por ejemplo, incluye criterios específicos para instalaciones clínicas, como el control de bioseguridad, la calidad del aire interior en zonas críticas y la eficiencia energética en sistemas HVAC especializados. Estas características lo hacen idóneo para hospitales con alta demanda técnica [5].

EDGE, por su parte, está orientado a infraestructuras hospitalarias en países en desarrollo y propone soluciones de bajo costo. WELL incorpora dimensiones psicosociales relacionadas con el bienestar del personal y los pacientes. En cambio, GGHH promueve una transformación institucional más integral, basada en políticas operativas sostenibles [7].

Todas estas certificaciones contemplan indicadores ambientales fundamentales. Entre ellos se encuentran el consumo energético por metro cuadrado ($\text{kWh/m}^2/\text{año}$), el consumo hídrico por paciente, la proporción de materiales con baja energía incorporada, y variables del ambiente interior como temperatura, concentración de CO_2 , COV, iluminación natural y confort térmico y acústico.

La integración de estos indicadores ha permitido establecer líneas base para evaluar la sostenibilidad en hospitales de manera más sistemática y objetiva [5], [7]. No obstante, existen limitaciones cuando se trata de su aplicación directa en áreas críticas como las UCIs. Actualmente, ninguna de estas certificaciones contempla

una subcategoría o módulo especializado para UCIs. Aunque LEED contempla requisitos generales para entornos clínicos, carece de métricas específicas para zonas con alta complejidad tecnológica, como las UCIs. Lo mismo ocurre con EDGE y GGHH, que no ofrecen criterios dirigidos al monitoreo ambiental o eficiencia energética en estos espacios.

En consecuencia, la aplicabilidad directa de estas herramientas a UCIs resulta limitada. Ahora bien, debemos tomar en cuenta que su estructura puede ser modificada para adaptarse a las características técnicas de estas unidades, lo que abre una vía para futuras mejoras normativas [5].

En la TABLA III mostramos una comparación entre todas las certificaciones mencionadas. Con esto, buscamos una visión clara de lo que se obtiene con cada certificación.

TABLA III. COMPARACION DE CERTIFICACIONES AMBIENTALES EN SALUD.

Sistema de Certificación	Enfoque Principal	Indicadores evaluados	Aplicabilidad en UCIs	Ref.
LEED for Healthcare	Energía, agua, calidad del aire, materiales sostenibles.	Consumo energético, calidad del aire interior, eficiencia hídrica, materiales, transporte.	Media: no tiene indicadores específicos para áreas críticas.	[5]
EDGE	Eficiencia energética, consumo de agua y materiales de bajo impacto.	Reducción del 20 % en energía, agua y materiales; costos de ciclo de vida.	Baja: orientada a edificios nuevos, escasa personalización por área funcional.	[77]
WELL Building Standard	Confort humano, calidad del aire, iluminación, ruido.	Iluminación circadiana, confort térmico, COV, ruido, bienestar emocional.	Baja: centrada en espacios de confort y bienestar general.	[78]
GGHH	Salud ambiental, liderazgo institucional, manejo de residuos y energía.	Residuos hospitalarios, uso de químicos, energía renovable, agua, alimentos.	Media: guía conceptual, no evalúa unidades funcionales de forma separada.	[79]

ESTRATEGIAS SOSTENIBLES APLICABLES A UCIs.

Las UCIs constituyen uno de los entornos hospitalarios más exigentes desde el punto de vista técnico y operativo. Frente a este panorama, la integración de estrategias sostenibles no solo es viable, sino también

necesaria para disminuir el impacto ambiental sin comprometer la calidad asistencial.

A continuación, se presentan las principales medidas que podrían ser implementadas en UCIs.

La eficiencia energética puede lograrse mediante la incorporación de luminarias LED con sensores de movimiento, sistemas HVAC con recuperación de calor y paneles fotovoltaicos. Estas medidas han demostrado reducir el consumo por cama crítica sin afectar la atención clínica [9], [80].

En cuanto a la eficiencia hídrica, el uso de griferías temporizadas, descargas dobles y sensores infrarrojos ha permitido disminuciones del 30 % en el consumo total de agua. La reutilización de aguas grises también ha sido efectiva, sin interferir con los protocolos de asepsia [7].

Por esta razón, la mejora de la calidad ambiental interior (IEQ) requiere mantener temperaturas entre 20–24 °C, humedad relativa del 30–60 % y niveles de CO₂ inferiores a 1000 ppm. La reducción de COV y mantener una temperatura ambiental estable se asocian a menores niveles de estrés clínico y tiempos de recuperación más rápidos [81].

La gestión de residuos es esencial en UCIs debido al alto volumen de residuos infecciosos. La separación en sitio, el uso de materiales biodegradables y la reducción de insumos desechables disminuyen errores de clasificación y los costos de disposición final [70].

En este sentido, la automatización y el monitoreo ambiental mediante sistemas BMS permite controlar variables críticas como temperatura, humedad e iluminación. La integración de sensores de medición en tiempo real fortalece la trazabilidad de los parámetros clínicos. También facilita la ejecución de intervenciones oportunas ante cualquier variación en el estado del paciente [82].

El uso de materiales sostenibles en UCIs incluye acabados libres de COV, mobiliario modular reciclado, pinturas ecológicas y superficies antibacterianas. Estas soluciones, alineadas con la bioseguridad clínica, han sido validadas en proyectos piloto en Europa y Asia [83].

La aplicación de estas permitiría demostrar que la adopción de estrategias sostenibles en las UCIs es técnicamente viable. A su vez, observar que son

altamente efectivas en términos de reducción de impacto ambiental, eficiencia operativa y mejora de las condiciones clínicas. La diversidad geográfica de los hospitales analizados (instituciones de América Latina, Europa y Asia) demuestra que estas prácticas pueden adaptarse a distintos contextos regulatorios, climáticos y económicos. Para esto debe existir un compromiso institucional con la sostenibilidad, dado que las UCIs presentan requerimientos técnicos específicos.

Por tanto, el análisis comparativo de estas experiencias internacionales ofrece un punto de partida sólido para el diseño de un modelo base de evaluación de sostenibilidad en UCIs, aplicable en contextos hospitalarios que aún no cuentan con criterios técnicos unificados para edificación verde en salud.

La Tabla IV se resume en un conjunto de estrategias sostenibles implementadas en UCIs. Estas fueron clasificadas según su área de impacto y el indicador que podría mejorarse. Estas prácticas no solo buscan reducir el consumo de recursos, sino también mejorar la eficiencia operativa sin comprometer la seguridad del entorno clínico.

TABLA IV. TABLA DE ESTRATEGIAS SOSTENIBLES APLICABLES A UCIs.

Estrategia	Área de impacto	Estrategia implementada	Ejemplo de hospital aplicado	Ref.
Iluminación LED con sensores de movimiento	Energía	Reducción en consumo eléctrico	Austral (Argentina)	[84]
HVAC con recuperación de calor y zonificación térmica	Energía	Mejora en eficiencia energética	Khoo Teck Puat (Singapur)	[76]
Sistemas de reutilización de aguas grises	Agua	Reducción en el uso de agua potable	Hospitales Clínicas (Brasil)	[80]
Uso de materiales sostenibles sin COV	Ambiente interior	Reducción de compuestos tóxicos y mayor confort	Karolinska (Suecia)	[7]
Clasificación de residuos y uso de insumos biodegradables	Residuos	Reducción en residuos infecciosos	Karolinska (Suecia), Austral (Argentina)	[9]

En conjunto, estas estrategias constituyen una hoja de ruta técnica para la transformación sostenible de las UCIs. La evidencia acumulada sugiere que, más allá de una exigencia normativa, la sostenibilidad en UCIs es un componente clave de la eficiencia institucional, la resiliencia hospitalaria y la mejora continua del entorno terapéutico.

METODOLOGÍA.

5.1 Tipo de estudio

Este estudio tiene un enfoque documental, exploratorio y comparativo, buscando una orientación al estudio de los indicadores de sostenibilidad para UCIs. Esto mediante el conocimiento de los indicadores técnicos, ambientales y operativos. La investigación no tiene en cuenta una intervención experimental directa, sino el análisis sistemático de fuentes bibliográficas, documentos técnicos e iniciativas institucionales. Estas son las que permiten establecer patrones, vacíos y elementos que pueden ser copiados en el diseño de modelos sostenibles para áreas críticas (UCIs) en hospitales.

La opción de tomar un enfoque exploratorio obedece la emergencia que surge de este tema. Por esta razón, la aplicación de estrategias y herramientas en el área de UCIs aún está en proceso de afianzamiento. Esto se debe al el nulo acogimiento y escasa normalización internacional [85]. En consecuencia, este tipo de estudio resulta útil para conocer el estado actual del conocimiento, identificar referentes normativos y comparar enfoques aplicados en distintos entornos enfocados a las áreas del hospital.

Además, el enfoque documental de la metodología deja ver la necesidad de dar evidencia proveniente de diversas fuentes confiables. Estas fuentes podrían ser revistas científicas, manuales técnicos de certificaciones ambientales (LEED, EDGE, GGHH), publicaciones de organismos multilaterales (OMS, IFC, BID) y casos de institucionales disponibles en medios académicos o gubernamentales. Este enfoque permitierecoger la información proveniente de diferentes niveles de evidencia, dando fuerza al análisis [77].

Por su parte, el enfoque comparativo es empleado para ver los indicadores extraídos con su aplicación real en hospitales que han implementado estrategias sostenibles en áreas críticas. Esta comparación busca evidenciar la

viabilidad de los criterios en diversos ámbitos (económicos, tecnológicos y geográficos) [69].

En síntesis, se trata de un estudio de tipo no experimental, con enfoque cualitativo y transversal. Este busca sistematizar y formular indicadores claves para un proceso de revisión y análisis estructurado. El final es brindar una herramienta metodológica que sirva para futuras aplicaciones prácticas o investigaciones en UCIs reales.

5.2 Selección de hospitales modelo internacionales

La selección de hospitales modelo representa una fase crítica del estudio, ya que permite identificar buenas prácticas, indicadores aplicados y soluciones replicables en el contexto de sostenibilidad hospitalaria. La revisión se enfocó en instituciones con intervenciones comprobadas en áreas críticas, particularmente UCIs, bajo condiciones documentadas y verificables.

Para la selección se definieron cinco criterios. En primer lugar, el reconocimiento institucional y certificación ambiental, con énfasis en hospitales acreditados bajo sistemas como LEED, EDGE, BREEAM u homologaciones regionales equivalentes [77]. Estas certificaciones aseguran un marco técnico normalizado para evaluar el desempeño ambiental. Segundo, se priorizó el acceso a documentación técnica confiable, incluyendo reportes de sostenibilidad, publicaciones científicas e informes institucionales. Esta condición garantiza validez técnica, replicabilidad y seguimiento de los datos presentados [78].

Tercero, la aplicación de estrategias sostenibles debía incluir al menos una UCI, para asegurar pertinencia clínica y relevancia operativa en áreas de alta complejidad. El cuarto criterio fue la representatividad geográfica y diversidad contextual, abarcando hospitales en América Latina, Europa y Asia. Se observaron variaciones en normativa, clima y disponibilidad tecnológica.

Finalmente, se consideró el alcance técnico replicable. En este se favorecen instituciones que presentan indicadores cuantificables, soluciones adaptadas a su contexto y experiencias documentadas.

Khoo Teck Puat Hospital (KTPH), Singapur. Es reconocido internacionalmente por su enfoque bioclimático, este hospital integra ventilación natural, iluminación solar y sistemas BMS aplicados a las UCIs

[86]. Dispone de certificación EDGE y estrategias como HVAC híbridos con recuperación de calor, zonificación térmica y mobiliario clínico sin COV.

Karolinska Institutet, Estocolmo, Suecia. Este es uno de los modelos de sostenibilidad. Sus UCIs incorporan sensores ambientales, gestión energética automatizada y aislamiento acústico [87]. Acreditado con LEED Platinum, el hospital aplica HVAC por zona crítica, control lumínico por presencia y participa en redes como Hospitals for Climate Action, asegurando trazabilidad de indicadores ambientales [88].

Hospital das Clínicas, São Paulo, Brasil. Este es el mayor complejo hospitalario de América Latina y ha iniciado reformas sostenibles sin certificación formal. Se han implementado sistemas HVAC VRF (flujo de refrigerante variable), sensores de ocupación, separación térmica por carga clínica y recuperación de aguas grises en UCIs [89].

Hospital Universitario Austral, Pilar, Argentina. Este hospital privado ha integrado progresivamente estrategias sostenibles. Inicialmente en áreas generales y luego en su UCI. Las intervenciones incluyen paneles solares híbridos, iluminación LED con sensores, mobiliario modular antimicrobiano y materiales con certificación ecológica (Cradle to Cradle, ISO 14001) [90]. También destaca el seguimiento interno de residuos y su participación en iniciativas como menos Huella, Más Salud [91].

La inclusión de estos hospitales en la metodología nos permite construir una base comparativa sólida. Con esto, logramos comparar instituciones de distintas escalas, climas, niveles tecnológicos y marcos normativos. Esta función refuerza el valor de generar un modelo y aporta insumos para diseñar indicadores adaptables a distintos niveles de complejidad hospitalaria.

En la siguiente gráfica se muestra la comparación entre cuatro hospitales internacionales (Karolinska, Khoo Teck Puat, Hospital das Clínicas y Austral) respecto a la implementación de estrategias sostenibles. Esto se dividió en seis parámetros de medida (energía, agua, residuos, calidad del aire interior, automatización y materiales). Se observa un mayor nivel de integración en Karolinska y KTPH. También observamos un menor desempeño relativo en hospitales de América Latina.

La figura 4 se justifica con el objetivo de visualizar las diferencias en el grado de avance de estrategias sostenibles en los hospitales seleccionados. Se construyó una matriz de análisis comparativo cualitativo. Esta permitió asignar un nivel de implementación (de 0 a 5) en seis parámetros de medida: energía, agua, residuos, calidad del aire interior, automatización y materiales. Los valores representados en la Figura 4 se asignaron a partir de un análisis cualitativo-comparativo basado en la presencia y madurez de estrategias descritas en fuentes oficiales, reportes técnicos y literatura científica revisada para cada hospital.

La escala utilizada fue: 5 = Implementación integral, certificada y con trazabilidad documentada. 4 = Implementación parcial con indicadores técnicos disponibles. 3 = Presencia de estrategias en desarrollo o sin trazabilidad completa. 2 = Menciones generales o sin especificidad para UCIs. 1 = Ausencia de datos verificables.

Esta matriz, construida con base en referencias [86], [87], [88], [89], [90], [91], representa una interpretación estructurada realizada por los autores a partir del contenido técnico disponible. Su objetivo es facilitar una comparación visual ordenada y funcional que sirva como insumo para el diseño del modelo de indicadores sostenibles propuesto en este estudio.

Desarrollo del análisis cualitativo por hospital

Karolinska Institutet (Suecia)
 Energía (5): Uso de HVAC zonificado, control lumínico por presencia y sensores ambientales [87].
 Agua (4): No se mencionan tecnologías hídricas

específicas en UCIs, pero sí trazabilidad general [88].
 Residuos (4): Participación en redes de acción climática hospitalaria que reportan residuos [88].
 Aire interior (5): Aislamiento acústico, ventilación zonificada, sensores de calidad del aire [87].
 Automatización (5): Gestión energética automatizada y sensores conectados a sistemas BMS [87].
 Materiales (4): Uso de materiales certificados no se detalla, pero sí construcción bajo LEED Platinum.

Khoo Teck Puat Hospital – KTPH (Singapur)

Energía (5): HVAC híbridos con recuperación de calor, paneles solares, zonificación térmica [86].
 Agua (5): Reutilización de aguas grises y sistemas de control hídrico [86].
 Residuos (4): Participación en sistemas de monitoreo ambiental, aunque no se detallan datos específicos.
 Aire interior (5): Ventilación natural combinada con sistemas mecánicos en zonas críticas [86].
 Automatización (5): Sistemas BMS aplicados a UCIs, control integrado [86].
 Materiales (4): Mobiliario sin COV y materiales con bajo impacto ambiental [86].

Hospital das Clínicas (Brasil)

Energía (3): HVAC VRF y sensores de ocupación, sin certificación ambiental formal [89].
 Agua (3): Recuperación de aguas grises, pero sin trazabilidad ni indicadores externos.
 Residuos (3): Manejo interno de residuos sin mención a indicadores cuantificados.
 Aire interior (3): Separación térmica por carga clínica, sin datos de calidad del aire o sensores.

Estrategias sostenibles por hospital

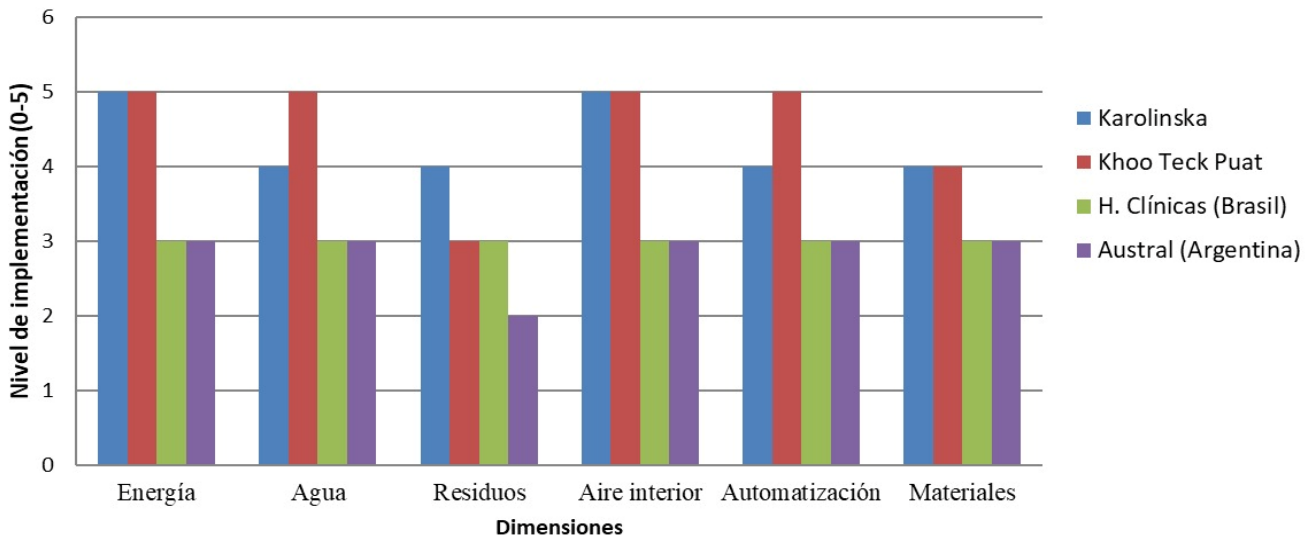


Figura 4. Análisis comparativo cualitativo de estrategias sostenibles en hospitales modelo. Los puntajes se asignaron en una escala de 0 a 5 tras un análisis comparativo de fuentes técnicas de cada hospital, según la madurez, cobertura e integración de estrategias

Automatización (3): Sensores básicos, pero sin integración con BMS ni monitoreo avanzado.
Materiales (3): Sin mención específica de materiales certificados.

Hospital Universitario Austral (Argentina)
Energía (4): Uso de paneles solares híbridos y tecnología LED [90].

Agua (3): No se describen tecnologías específicas para UCIs en gestión hídrica.
Residuos (3): Participación en “Menos Huella, Más Salud”, pero sin datos comparativos [91].
Aire interior (3): No se detallan sistemas específicos.
Automatización (3): Iluminación con sensores, pero sin sistemas BMS completos.
Materiales (3): Materiales certificados (Cradle to Cradle, ISO 14001) y mobiliario modular [90].

TABLA V. ANALISIS COMPARATIVO DE HOSPITALES MODELOS SOSTENIBLES.

Hospital	Certificación	Consumo energético estimado (kWh/m ² /año)	Recuperación de aguas grises	Automatización (BMS u otro)	Gestión de residuos	Ref.
Khoo Teck Puat (Singapur)	EDGE	Menor o igual 400	No aplica	Sí, con sensores CO ₂ y presión positiva	Clasificación en origen, insumos reutilizables, monitoreo digital de residuos infecciosos	[86]
Karolinska (Suecia)	LEED Platinum	Menor o igual 350	No documentado	Sí, HVAC zonificado y monitoreo ambiental	Estaciones de separación, auditoría externa, reducción de plásticos	[87]
Hospital das Clínicas (Brasil)	Sin certificación oficial	aproximadamente 500	Implementado	Parcial, HVAC con sensores de ocupación	Protocolos internos, registros de residuos peligrosos, insumos biodegradables	[89]
Austral (Argentina)	Sin certificación oficial	aproximadamente 450	No aplica	Parcial, iluminación y energía solar	Indicadores internos por tipo de residuo, programas de reciclaje y reducción	[90]

TABLA VI. METRICAS PARA LA MEDICION DE LOS INDICADORES ANALIZADAS

Métrica de medición	Indicador	Unidad / Parámetro	Ref.
Eficiencia energética	Consumo energético por cama crítica	kWh/cama/mes	[66], [92]
	Índice de intensidad energética (IIE)	Relación energía/procedimientos	[66], [92]
	Porcentaje de energía renovable utilizada	% sobre consumo total	[66], [92]
Eficiencia del agua	Reutilización de aguas grises	Presencia de sistema (sí/no)	[9]
	Dispositivos de bajo consumo	Grifos/sanitarios eficientes instalados	[15]
Calidad ambiental interior	Temperatura y humedad controlada	°C y % HR (ASHRAE 170)	[68]
	Concentración de CO ₂	ppm	[35]
	Niveles compuestos orgánicos volátiles (COV)	mg/m ³ o ppm	[69], [62]
	Nivel de ruido	Decibel (dB)	[69], [62]
	Iluminación natural disponible	% Área útil iluminada	[69], [62]
Gestión de residuos	Proporción de residuos infecciosos	% sobre el total generado	[70]
	Separación correcta en sitio	% cumplimiento	[70]
	Volumen de residuos reciclables	kg/mes	[70]
	Uso de insumos reutilizables/biodegradables	% sobre compras totales	[70]
Automatización y monitoreo	Variables automatizadas	% controladas por el sistema de gestión de edificios (BMS)	[71]
	Tiempo de respuesta	minutos	[71]
	Integración con alarmas clínicas	Sí / No	[71]
	Registro histórico y trazabilidad	Sí / No	[71]
Materiales sostenibles	Proporción de materiales sin compuestos orgánicos volátiles (COV)	% superficie cubierta	[7], [72]
	Mobiliario clínico sostenible	% mobiliario con criterios verdes	[7], [72]
	Materiales con baja energía incorporada	kWh/kg o LA documentada	[7], [72]
	Superficies antimicrobianas	% de pisos/paredes.	[7], [72]

TABLA VI. INDICADORES DE EFICIENCIA ANALIZADOS

5.3 Fuentes utilizadas (bases de datos, planos, literatura técnica)

Este estudio se validó y fundamentó mediante una revisión completa de información obtenida de diversas fuentes. Para ello, se consultaron desde revistas científicas, documentos normativos internacionales hasta archivos institucionales de hospitales que han implementado estrategias sostenibles en UCIs. La orientación de este documento busca garantizar el seguimiento del conocimiento y la comparación de datos.

A continuación, se describen las fuentes utilizadas agrupadas por tipo:

1. Bases de datos académicas y científicas. Se utilizaron bases de datos y revistas científicas reconocidas, priorizando artículos entre 2015 y 2024, revisados por pares y de acceso abierto: ScienceDirect, PubMed, Scopus, SpringerLink, Wiley Online Library, MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute), Taylor & Francis Online

Los criterios de búsqueda se estructuraron mediante operadores booleanos y descriptores como: "ICU

sustainability”, “green hospital”, “energy efficiency healthcare”, “smart hospital infrastructure”, “critical care environmental impact”, “LEED healthcare indicators”, entre otros.

Esta búsqueda permitió recopilar más de “93” artículos, de los cuales se seleccionaron “49” tras aplicar filtros de pertinencia, actualidad, relevancia técnica y aplicabilidad a UCIs.

2. Literatura gris, guías y normativas técnicas. Para complementar la evidencia académica, se revisaron documentos publicados por organismos con una alta credibilidad institucional. Entre los más relevantes: LEED v4 for Healthcare (US Green Building Council), EDGE for Hospitals Guide (IFC – International Finance Corporation), ASHRAE 170-2021 (Ventilation for Healthcare Facilities), Global Green and Healthy Hospitals (GGHH) Agenda, Health Care Without Harm Reports, Sustainable Development Goals (SDG) Health Targets, WHO Environmental Guidelines for Health Facilities, ISO 14001: Environmental Management Systems – Requirements, Guidelines for Green Hospitals – BID y UNEP.

Estas fuentes permitieron definir indicadores estructurales validados, estándares de medición ambiental en salud y modelos de certificación para la infraestructura de áreas críticas. Estas las dirigimos especialmente a las UCIs.

3. Documentación institucional hospitalaria. Se agregó con el objetivo de incluir casos reales y verificables. También se incorporaron documentos técnicos generados por hospitales que han implementado prácticas sostenibles. Estos documentos incluyen: Informes de sostenibilidad hospitalarios, planos

arquitectónicos con criterios LEED o EDGE, manuales operativos de eficiencia energética hospitalaria, reportes de implementación de sensores, fichas técnicas de unidades de cuidados intensivos con medidas sostenibles documentadas.

Los hospitales de los cuales se extrajeron dichos documentos incluyen: Khoo Teck Puat Hospital (Singapur), Karolinska Institutet (Suecia), Hospital das Clínicas (Brasil) y Hospital Universitario Austral (Argentina). En algunos casos, se consiguió el acceso a algunas páginas institucionales, ponencias en congresos de arquitectura hospitalaria y publicaciones en portales académicos de salud pública.

4. Herramientas de gestión documental: Para la organización, referencias y análisis de las fuentes se utilizó el software de gestión bibliográfica Mendeley, el cual nos facilitó la exportación de referencias en formato IEEE, la identificación de duplicados y la generación de citas automáticas dentro del artículo.

También se emplearon tablas de extracción de datos con parámetro de medidas temáticas (energía, agua, materiales, residuos, automatización) y herramientas como Excel para el análisis cruzado entre tipo de fuente, nivel de evidencia y hospital de referencia. También se usaron estrategias metodológicas para contrastar los datos obtenidos en tres niveles. Evidencia científica (papers), normativas técnicas (manuales, guías, certificaciones), experiencia institucional (casos reales documentados).

Esto permitió garantizar que los indicadores y estrategias evaluadas no solo fueran técnicamente válidas, sino también viablemente implementables en contextos hospitalarios reales y auditable.

A continuación, se describen las principales restricciones identificadas:

VII. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Cualquier estudio que se base en la revisión y comparación de documentos, siempre enfrentará limitaciones. Estas pueden ser de tipo metodológico, operativo o contextual. Por esta razón, es crucial mencionarlas para que se entienda bien hasta dónde llegan nuestros resultados. Es importante destacar que estas restricciones no anulan lo que hemos concluido.

1. Ausencia de estandarización de indicadores específicos para UCIs. Uno de los principales obstáculos en la literatura y en las certificaciones ambientales actuales es la falta de un sistema normativo internacional. Además de uno que fije indicadores técnicos específicamente diseñados para UCIs. Si bien existen estándares para edificios hospitalarios en general, estos suelen evaluar el desempeño ambiental desde una

perspectiva macro, sin un desglose por unidades funcionales.

Por esta razón, se dificulta el seguimiento de datos por área crítica. En efecto, la mayoría de los informes de sostenibilidad no presentan métricas específicas para UCIs, obligando a realizar deducciones no específicas a partir de datos generales del edificio hospitalario.

2. Disparidad en la disponibilidad y calidad de la información. Otro gran reto que nos topamos fue la inconsistencia en la calidad, profundidad y formato de los datos disponibles de los hospitales estudiados. Mientras algunas instituciones (como Karolinska o KTPH) cuentan con informes detallados y seguimiento por unidad, otras presentan reportes generales, limitados o desactualizados, especialmente en el contexto latinoamericano. Esto puede desviar el análisis, ya que no todas las estrategias están igualmente documentadas ni sometidas a auditorías externas.

3. Enfoque no experimental. El esquema metodológico del estudio es de tipo documental, exploratorio y comparativo. Sin la recopilación de datos primarios ni intervención directa sobre las instituciones analizadas. Esto implica que no se realizaron visitas técnicas a hospitales, no se aplicaron cuestionarios ni entrevistas a personal clínico o técnico, y no se hizo seguimiento de los resultados ambientales.

4. Limitaciones contextuales y económicas. Este estudio no aborda de forma directa las limitaciones económicas, logísticas o políticas que podrían existir en algunos hospitales. Por ello, es importante implementar estrategias sostenibles, especialmente en países de ingresos bajos o medianos. Si bien se analizan indicadores escalables, su viabilidad dependerá de múltiples factores externos al diseño metodológico. Estos serían la normativa sanitaria nacional, la capacidad de inversión institucional, cultura general del país, infraestructura ya existente.

5. Riesgo de obsolescencia tecnológica. Dado que el campo de la sostenibilidad hospitalaria evoluciona rápidamente, existe el riesgo de que algunos indicadores, materiales o tecnologías referenciadas pierdan vigencia en pocos años. Por ello, el modelo propuesto debe ser actualizado periódicamente y vinculado a fuentes dinámicas como actualizaciones LEED, EDGE o ASHRAE.

6. Desigualdad institucional en el acceso a la publicación científica. Numerosos hospitales que adoptan procesos de sostenibilidad publican sus resultados en reportes internos o medios institucionales. Lo cual, puede generar desigualdad en la información y falta de revisión de este. Este fenómeno limita la objetividad de algunos indicadores reportados y refuerza la necesidad de la recopilación bibliográfica.

Aunque estas limitaciones hacen que nuestro estudio sea más bien exploratorio, eso no le resta importancia. De hecho, lo convierten en un paso crucial para poder validar un modelo de indicadores que realmente sirva en las UCIs. La idea es que, en el futuro otras investigaciones puedan superar estas barreras. Podría ser con un análisis directamente en el terreno, con estudios de caso más largos o incluso poniendo a prueba algunas propuestas ya existentes.

VIII. DISCUSIÓN.

Este artículo permitió analizar indicadores de sostenibilidad adaptables y aplicables a UCIs. En consecuencia, se estudiaron seis parámetros de medición aplicables a UCI, tales como: energía, agua, calidad ambiental interior, residuos, automatización y materiales. A partir de ese análisis se observó que estos indicadores pueden medirse, adaptarse e integrarse en sistemas de gestión hospitalaria ya sea UCI u otra área crítica del hospital.

En este sentido, los resultados reflejan que las UCI presentan un mayor impacto ambiental versus otras áreas del hospital. En cuanto al consumo energético, se identificó que es el indicador que muestra la mayor demanda dentro del hospital, con números que alcanzan hasta 2,200 kWh/m²·año. Esto se debe al funcionamiento continuo de sistemas HVAC y equipamiento biomédico especializado [15]. En el parámetro del agua, la implementación de grifos temporizados y sistemas de reutilización de aguas grises permite una reducción estimada del 25 al 30 % en el uso de agua potable [30]. Con respecto a la calidad ambiental interior, se destaca el empleo de materiales sin COV, lo que mejora las condiciones del aire y el confort ambiental, especialmente en pacientes inmunocomprometidos [28].

En relación con los residuos, la adecuada clasificación y el uso de insumos biodegradables pueden reducir hasta un 20 % los residuos infecciosos generados en estas unidades [21]. Un estudio realizado en el Hawke's Bay

Hospital ejecutó una auditoría de residuos y mostró que el 25 % de los residuos generales podrían enviarse a vertedero [6]. En las UCIs, el 11.4% del material reciclable se desechó en la basura general [93]. Por otra parte, la automatización, mediante sensores y tecnologías inteligentes, permiten una monitorización constante de los parámetros ambientales y energéticos. La implementación de estos optimiza la eficiencia operativa de los equipos biomédicos [19]. Por último, el uso de materiales sostenibles como mobiliario y pinturas ecológicas, contribuyen a la reducción de la huella ambiental de áreas críticas como las UCI [28]. Estos resultados aumentan la urgencia de crear indicadores específicos que permitan evaluar estas áreas de forma independiente al resto del hospital.

Al comparar los resultados con la literatura revisada, se notó una coincidencia en estudios como los de McGain et al. [27] y See [86]. En estos estudios ellos alertan sobre la alta huella ecológica de las UCI y la falta de normativas ambientales específicas para estas áreas. Asimismo, los datos son coherentes con lo documentado en las guías de Health Care Without Harm [3] y las recomendaciones de ASHRAE 170 [69]. En estas se señala lo importante que es controlar las variables ambientales como CO₂, temperatura y COVs, a diferencia de estudios enfocados en el hospital completo. De este modo, este artículo permite evaluar el impacto ambiental a nivel funcional y operativo dentro de las UCI.

Los hospitales modelo analizados apoyan los resultados obtenidos en este artículo. En instituciones como Karolinska (Suecia) y Khoo Teck Puat (Singapur) se han implementado sistemas avanzados de automatización y eficiencia energética. Con esto, lograron reducir significativamente el consumo eléctrico y emisiones [87], [88]. Por otro lado, hospitales latinoamericanos como el Hospital das Clínicas y el Hospital Universitario Austral han demostrado que es posible adoptar soluciones sostenibles. Incluso sin certificaciones formales, aunque tienen menos datos sobre los indicadores [90], [91]. Esta comparación prueba que los indicadores escogidos son adaptables a diferentes contextos económicos, normativos y tecnológicos.

A pesar de estos avances, el estudio tiene limitaciones que se relacionan a su enfoque documental. La falta de datos por UCI en América Latina y la ausencia de métricas para áreas críticas limita la uniformidad de los resultados. Además, al no haberse realizado mediciones en sitio, ni entrevistas con personal técnico, se requiere validación empírica de los indicadores escogidos. No obstante, este artículo serviría como orientación para futuras investigaciones y auditorías ambientales en UCI.

Finalmente, se recomienda el desarrollo de investigaciones prácticas, para comprobar la eficiencia de estos indicadores en hospitales reales. Así mismo, la creación de guías técnicas específicas para sostenibilidad en UCI. También se propone explorar nuevas tecnologías como IoT biomédico, materiales con baja energía incorporada y modelos predictivos de consumo. Estas tecnologías podrían lograr fortalecer la gestión ambiental de estas áreas críticas.

CONCLUSIÓN.

Este estudio permitió identificar y analizar un conjunto de indicadores aplicables específicamente a las UCIs. Estos indicadores se basaron en seis parámetros esenciales para evaluar su sostenibilidad ambiental y operativa. El enfoque utilizado integró elementos técnicos, normativos y de casos reales que reflejan las condiciones de alta complejidad de estas áreas críticas.

Se demostró que existen estrategias sostenibles viables para UCIs que no comprometen la seguridad clínica ni la eficiencia del servicio. Indicadores como la eficiencia energética, el control ambiental interior y la clasificación adecuada de residuos, representan oportunidades de mejora con beneficios documentados en instituciones de salud de diversos contextos.

El análisis comparativo entre hospitales nos permitió visualizar buenas prácticas replicables y limitaciones comunes en cuanto a la disponibilidad de indicadores específicos para áreas críticas. Esto deja en evidencia una deficiencia en la regulación normativa que podría ser atendida mediante la adaptación de indicadores o certificaciones ya existentes. Además, se puede estudiar la futura construcción de criterios especializados.

De este modo, se reconoce que la sostenibilidad hospitalaria debe abordarse de forma integral, incorporando dimensiones ambientales, sociales y económicas. La implementación progresiva de mejoras sostenibles en UCIs podría traducirse en mayor solidez institucional, reducción de costos operativos y mejoras en el entorno terapéutico.

Este trabajo es un análisis crítico de la sostenibilidad en áreas hospitalarias de alta demanda. También puede servir como herramienta para auditorías internas y procesos de mejora continua. Se recomienda continuar con estudios empíricos que validen estos indicadores en entornos reales. Sobre todo, en proyectos piloto en UCIs de distintas escalas y entornos geográficos. De esta manera, nace una línea de investigación para el diseño indicadores en certificación ambiental específico para

áreas críticas como las UCIs. Estas deben contemplar métricas diferenciadas y adaptables su entorno.

El desarrollo de una guía estructurada con normativas y basadas en evidencia científica nos da una hoja de ruta a la sostenibilidad. Asimismo, estas deben ser aplicables tanto en hospitales nuevos como en los ya existentes. De esta manera, se presenta la oportunidad para avanzar hacia infraestructuras hospitalarias verdaderamente sostenibles.

REFERENCIAS.

- [1] J.C. Gómez Chaparro, “*Impacto de la ingeniería hospitalaria en el mantenimiento*,” Ph. D. Thesis. Universidad de Extremadura, 2020. [Online]. Available: https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/11701/1/TDUEX_2020_Gomez_Chaparro.pdf
- [2] A. Alotaiby and E. Krenyacz, “Energy efficiency in healthcare institutions,” *International Review of Applied Sciences and Engineering*, vol. 45, no. 4, pp. 494–501, 2023, [Online]. Available: <https://akjournals.com/view/journals/204/45/4/article-p494.xml>
- [3] Health Care Without Harm, “Health care’s climate footprint: How the health sector contributes to the global climate crisis,” Health Care Without Harm, 2019. [Online]. Available: <https://noharm-global.org/documents/health-care-climate-footprint-report>
- [4] World Health Organization, “Climate change and health,” World Health Organization, 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- [5] “LEED v4 for Healthcare,” U.S. Green Building Council, 2020. [Online]. Available: <https://www.usgbc.org/leed/v4>
- [6] T. W. O. H. N. Zealand, “Hawke’s Bay Hospital,” 2024.
- [7] U. N. E. P. (UNEP), “Greening Health Systems,” World Health Organization, 2013. [Online]. Available: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/35053/9/WHO-EURO-2013-4501-44264-62527-eng.pdf>
- [8] “Climate-Smart Healthcare: Low-carbon and Resilience Opportunities for the Health Sector,” World Bank, 2017. [Online]. Available: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/27809>
- [9] E. Fischel, I. Sánchez, and G. Núñez, *Edificios verdes para el sector salud: Identificación de medidas costo-efectivas para un diseño sostenible*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2019.
- [10] L. Blanch *et al.*, “What is an intensive care unit? A report of the task force of the World Federation of Societies of Intensive and Critical Care Medicine,” *J Crit Care*, vol. 36, pp. 301–305, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.jcrc.2016.07.015.
- [11] J. Le Gall, P. Loirat, and A. Alperovitch, “APACHE II—A severity of disease classification system,” *Crit Care Med*, vol. 14, no. 8, pp. 754–755, Aug. 1986, [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3087704/>
- [12] S. I. Delgado and others, “Complex Sepsis Presentations, SEP-1 Compliance, and Outcomes,” *JAMA Netw Open*, Jul. 2025, [Online]. Available: <https://jamanetwork.com/journals/jamanetworkopen/fullarticle/2831700>
- [13] J. H. Ballard and others, “Critical-care-unit bedside design and its impact on infection transmission during construction and renovation,” *Journal of Hospital Infection*, vol. 110, pp. 25–32, 2021, [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10981659/>
- [14] S. Czajka and others, “Validation of APACHE II, APACHE III and SAPS II scores in a mixed adult ICU in Poland,” *BMC Anesthesiol*, vol. 20, p. 296, Dec. 2020, [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33267777/>
- [15] K. Kim and others, “Mortality Prediction Using SOFA Score in Critically Ill Surgical Patients,” *Supportive Care in Cancer*, Jan. 2020, [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32512741/>
- [16] H. R. Drinhaus, T. D. Brandt, and M. L. Riedel, “What(w)at counts in electricity consumption in the intensive care unit,” *BMC Anesthesiol*, 2023, [Online]. Available:

- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10119198/>
- [17] Y. Akpan and R. Elsen, "Modern ICU design: A literature review on layout, infection control, and technology integration," *International Journal of Medical Science and Health Research*, vol. 4, no. 4, pp. 40–63, 2024, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/384430156_Modern_Intensive_Care_Unit_Design_A_Literature_Review
- [18] C. S. Rasmy and others, "A review of AI applications in ICU patient monitoring and decision support," *Front Med (Lausanne)*, vol. 10, p. 1109411, Mar. 2023, [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmed.2023.1109411/full>
- [19] M. Arab-Zozani, H. Ghodsi, and M. Pezeshki, "Assessment of medical equipment maintenance management in hospitals: a systematic review," *Biomed Eng Online*, vol. 20, p. 49, 2021, [Online]. Available: <https://biomedical-engineering-online.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12938-021-00885-5>
- [20] D. J. Birnbach, J. R. Rosenberg, D. Fitzpatrick, and J. Carling, "Operating room environmental services do not clean everything they should: A direct observation study," *Am J Infect Control*, vol. 49, no. 7, pp. 845–850, 2021, [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8068504/>
- [21] A. Almalki, A. I. Khan, M. Hossain, M. Alzahrani, A. Almalki, and F. Almalki, "Healthcare Internet of Things (H-IoT): Current Trends, Future Prospects, Applications, Challenges, and Security Issues," *IEEE Access*, 2023, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/370375282_Healthcare_Internet_of_Things_H-IoT_Current_Trends_Future_Prospets_Applications_Challenges_and_Security_Issues
- [22] J. West, S. Jarvis, L. Williamson, and others, "Workforce management and patient outcomes in intensive care: insights from COVID-19," *J Clin Nurs*, vol. 30, no. 1, pp. 120–133, 2021, [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8447459/>
- [23] F. McGain, D. Naylor, R. King, and S. Tait, "Steam sterilisation's energy and water footprint," *Am J Infect Control*, vol. 44, no. 3, pp. 272–277, 2016, [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27075773/>
- [24] C. Balasubramanian, P. Prasad, and D. Raghavan, "Environmental sustainability in hospitals – A systematic review," *J Health Serv Res Policy*, 2013, [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24813186/>
- [25] A. J. Cass, J. M. Zimmerman, and E. C. Lee, "Environmental footprint of regular and intensive inpatient care in a US tertiary hospital: life cycle assessment of ICU vs. general care," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 26, pp. 779–793, 2021, [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-021-01998-8>
- [26] S. R. McGain, T. Humphrys, J. D. Yurek, and others, "Environmental sustainability in intensive care: key factors in energy, waste, and carbon footprint," *Crit Care*, vol. 28, no. 1, 2024, [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10515098/>
- [27] W. C. on E. and Development, *Our Common Future (Informe Brundtland)*. Oxford University Press, 1987. [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- [28] B. Purvis, Y. Mao, and D. Robinson, "Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins," *Sustain Sci*, vol. 14, pp. 681–695, 2019.
- [29] J. J. De Waele, N. Hunfeld, and H. Baid, "Environmental sustainability in intensive care: the path forward — An ESICM Green Paper," *Intensive Care Med*, vol. 50, no. 11, pp. 1729–1739, 2024, doi: 10.1007/s00134-024-07662-7.
- [30] D. Stymiest, "Health Care Energy Management Benchmarking," 2010. [Online]. Available: https://www.ssr-inc.com/wp-content/uploads/07.01.10_HealthCare_Energy_Management_Benchmarking.pdf
- [31] H. A. Tehran and others, "Air Pollution in Hospitals: A Critical Public Health Emergency," *Unspecified Source*, 2021, [Online]. Available: https://www.health-providers.ir/article_216591_9759a3c4d5566b11d0c0917dfd2d3211.pdf

- [32] V. Garg and N. K. Bansal, "Smart Occupancy Sensors to Reduce Energy Consumption," in *Energy and Buildings (Elsevier)*, 1999. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/222702674_Smart_occupancy_sensors_to_reduce_energy_consumption
- [33] M. Azimi and B. Stephens, "HVAC Filtration and Energy Implications in Healthcare Facilities," 2013. [Online]. Available: https://built-envi.com/publications/azimi_stephens_2013_be_influenza_filtration.pdf
- [34] C. C. S. Collaborative, "Burnout Syndrome in Critical Care Health-care Professionals: A Call for Action," 2016. [Online]. Available: <https://www.thoracic.org/statements/resources/cc/burnout-syndrome.pdf>
- [35] T. Shanafelt, "Physician Well-being 2.0: Where Are We and Where Are We Going?," 2022. [Online]. Available: <https://www.aeromedconference.com/wp-content/uploads/2022/09/Wellbeing-2.0-Shanafelt.pdf>
- [36] E. T. W. Group, "Triage of Intensive Care Patients: identifying agreement and controversy," *J Med Ethics*, 2022, [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5549951/>
- [37] K. Ganapathy and others, "Telemedicine to Expand Access to Critical Care Around the World," 2022. [Online]. Available: <https://www.binasss.sa.cr/oct22/21.pdf>
- [38] J. Eckelman and K. Sherman, "Hospital Energy Benchmarking Guidance Version 1.0," 2016. [Online]. Available: <https://escholarship.org/content/qt4k88k7qd/qt4k88k7qd.pdf>
- [39] United Nations, "Salud y bienestar - Objetivo de Desarrollo Sostenible 3," 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>
- [40] J. Frenk and D. de Ferranti, "Universal health coverage: the third global health transition?," *The Lancet*, vol. 380, no. 9845, pp. 861–862, 2012, doi: 10.1016/S0140-6736(12)61340-3.
- [41] M. Marmot, S. Friel, R. Bell, T. A. J. Houweling, and S. Taylor, *Closing the gap in a generation: health equity through action on the social determinants of health*. World Health Organization, 2008. [Online]. Available: https://books.google.com.pa/books?hl=es&lr=&id=zc_VfH7wfV8C
- [42] S. Padte, V. S. Venkata, P. Mehta, S. Tawfeeq, R. Kashyap, and S. Surani, "21st Century Critical Care Medicine: An Overview," *World J Crit Care Med*, vol. 13, no. 1, p. 90176, 2024, doi: 10.5492/wjccm.v13.i1.90176.
- [43] United Nations, "Agua limpia y saneamiento - Objetivo de Desarrollo Sostenible 6," 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- [44] Y. E. Lin, J. E. Stout, and V. L. Yu, "Controlling Legionella in hospital drinking water: an evidence-based review of disinfection methods," *Infect Control Hosp Epidemiol*, vol. 32, no. 2, pp. 166–173, 2011, doi: 10.1086/657934.
- [45] G. J. Gorse, R. L. Messner, and N. D. Stephens, "Association of malnutrition with nosocomial infection," *Infect Control Hosp Epidemiol*, vol. 10, no. 5, pp. 194–203, 1989, doi: 10.1017/S0195941700065010.
- [46] Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Healthcare Facilities and Power Outages: Guidance for Resilient Planning," 2020. [Online]. Available: <https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-07/healthcare-facilities-and-power-outages.pdf>
- [47] F. McGain, A. R. Kuppusamy, C. J. Story, C. Saunders, S. Ramanan, and F. D. McGain, "The carbon footprint of treating patients with septic shock in the ICU," *Crit Care*, vol. 25, no. 1, 2021, doi: 10.1186/s13054-021-03459-5.
- [48] J. Hervás-Zaragoza, M. Castilla, J. A. Roca, A. González-Vidal, and A. F. Skarmeta, "Microgrids as a mechanism for improving energy resilience during grid outages: A post-COVID-19 case study for hospitals," *Renew Energy*, vol. 199, pp. 308–319, 2022, [Online]. Available: <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/119120/1/1-s2.0-S0960148122013106-main.pdf>

- [49] United Nations, "Industria, innovación e infraestructura - Objetivo de Desarrollo Sostenible 9," 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infraestructura/>
- [50] D. H. Stamouli, P. G. Michalopoulos, M. A. Latsou, and S. K. Liosis, "Next level of hospitalisation through smart ICU," *Sensors and Actuators Reports*, vol. 4, 2022, doi: 10.1016/j.snr.2022.100113.
- [51] G. Kucan, A. Eiring, T. Schaffner, J. Haselsteiner, H. Pung, and L. B. Larsen, "Sustainable Future-Proofing Healthcare Facilities: A Modular and Adaptable Design Approach," 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/380462104_Sustainable_Future-Proofing_Healthcare_Facilities_A_Modular_and_Adaptable_Design_Approach
- [52] P. Psillaki, E. Tsiमितros, K. Misopoulou, and C. A. Frangopoulos, "Hospitals' Energy Efficiency in the Perspective of Saving Resources and Providing Quality Services through Technological Options: A Systematic Literature Review," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 2, 2023, doi: 10.3390/en16020755.
- [53] U. Nations, "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development," 2015. [Online]. Available: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [54] United Nations, "Energía asequible y no contaminante - Objetivo de Desarrollo Sostenible 7," 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [55] United Nations, "Acción por el clima - Objetivo de Desarrollo Sostenible 13," 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- [56] Y. Li and H. Wang, "BIM-Based Green Hospital Building Performance Pre-Evaluation: A Case Study," *Sustainability*, vol. 14, no. 4, p. 2066, 2022, doi: 10.3390/su14042066.
- [57] D. Elgebaly, "Sustainable HVAC System Using Energy Modeling," *Sustainability*, vol. 17, no. 8, p. 3312, 2024, doi: 10.3390/su17083312.
- [58] T. Olatunde, M. Enabulele, and F. O. Obonor, "Review of energy-efficient HVAC technologies for sustainable buildings," *International Journal of Scientific and Technical Research in Architecture*, 2024, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/380207442_Review_of_energy-efficient_HVAC_technologies_for_sustainable_buildings
- [59] A. S. A. C. Khafiso T, "Assessment of energy-saving strategies mitigating high energy usage in residential buildings," *Property Management*, 2024, doi: 10.1108/pm-12-2024-0126.
- [60] X. Zhang, "Optimizing the energy saving potential of public hospital through a systematic approach for green building certification in Malaysia," *Energy Reports*, 2021, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/354006695_Optimizing_the_energy_saving_potential_of_public_hospital_through_a_systematic_approach_for_green_building_certification_in_Malaysia
- [61] W. C. Munonye and G. O. Ajonye, "Energy-driven circular design in the built environment: rethinking architecture and infrastructure," *Frontiers in Sustainable Cities*, vol. 7, p. 1569362, 2025, doi: 10.3389/frsc.2025.1569362.
- [62] W. H. Organization, "Health-care waste, Fact Sheet," World Health Organization, 2018. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste>
- [63] A. Eslami, A. Khayami, and others, "Economic evaluation of hazardous healthcare waste treatment systems: a case study in Iran," *Sci Rep*, vol. 14, p. 69940, 2024, [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-69940-0>
- [64] A. Kerekes and others, "A Review on Medical Waste Management: Treatment, Recycling methods and cost effect," *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 9, p. 146, 2021, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3298/9/11/146>
- [65] P. M. E. C. Costa F, "Reprocessing of Single-Use Medical Devices in hospital environment: evolution and future perspectives," *Waste Management*, vol. 104, pp. 200–209, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.01.021.

- [66] Y. Miao, "Crafting sustainable healthcare environments using green building rating systems," *Sustainability*, vol. 16, no. 5, p. 1954, 2024, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/5/1954>
- [67] U. S. E. P. Agency, "WaterSense at Work: Best Management Practices for Commercial and Institutional Facilities," 2012.
- [68] ASHRAE, "Standard 170-2021: Ventilation of Health Care Facilities," American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021. [Online]. Available: https://www.techstreet.com/standards/ashrae-170-2021?product_id=2222136
- [69] F. Gómez-Ochoa and et al., "GREEN ICU: Unidad de Cuidados Intensivos responsable y sostenible," *Med Intensiva*, vol. 48, no. 4, 2024, [Online]. Available: <https://www.medintensiva.org/es-green-icu-unidad-cuidados-intensivos-articulo-S0210569123003194>
- [70] "Sustainable waste management: A guide for the healthcare sector," Health Care Without Harm, 2024. [Online]. Available: <https://europe.noharm.org/resources/sustainable-waste-management-guide-healthcare-sector>
- [71] Arrow Electronics, "Smart Hospital Technologies and Solutions in the Intensive Care Unit," 2024. [Online]. Available: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/smart-hospital-technologies-and-solutions-in-the-intensive-care-unit>
- [72] J. Karliner and S. Manogaran, "Climate-smart healthcare: What does it entail?," in *Climate Change and the Health Sector: Healing the World*, Routledge India, 2021, pp. 119–130. doi: 10.4324/9781003190516-16.
- [73] P. A. Prasad and others, "Environmental footprint of regular and intensive inpatient care in a large US hospital," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 26, pp. 779–793, 2021, doi: 10.1007/s11367-021-01998-8.
- [74] "A process-based life cycle assessment of the climate impact of a Swedish intensive care unit," *PubMed Central (PMC)*, 2024, [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12134305/>
- [75] Centers for Disease Control and P. (CDC), "Emergency Water Supply Planning Guide for Hospitals and Health Care Facilities," 2019. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/water-emergency/media/pdfs/2024/07/emergency-water-supply-planning-guide-2019-508.pdf>
- [76] C. Smale and others, "How to interpret green? A multiple perspective approach to sustainability in the ICU," *Crit Care*, vol. 29, p. 80, 2025, doi: 10.1186/s13054-025-05316-8.
- [77] I. F. C. (IFC), "EDGE User Guide for Hospitals," International Finance Corporation, 2020. [Online]. Available: <https://edgebuildings.com/wp-content/uploads/2022/04/211026-EDGE-User-Guide-for-All-Building-Types-Version-3.0.A.pdf>
- [78] I. W. B. Institute, "WELL Building Standard v2 – Concepts," 2020.
- [79] G. Green and H. Hospitals, "Global Green and Healthy Hospitals Agenda," 2017.
- [80] "Solutions enabling the healthcare facility ahead of its time," Schneider Electric, 2024. [Online]. Available: <https://www.se.com/us/en/download/document/998-23346267/>
- [81] A. Levina, I. Ilin, D. Gugutishvili, and K. Kochetkova, "Towards a Smart Hospital: Smart Infrastructure Integration," *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 10, no. 11, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100339>
- [82] "Circular economy for medical devices: Barriers, opportunities and policy recommendations," *Resour Conserv Recycl*, vol. 208, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107719>
- [83] "Global Road Map for Health Care Decarbonization," Health Care Without Harm, 2021. [Online]. Available: https://healthclimateaction.org/sites/default/files/2021-06/Health%20Care%20Without%20Harm_Health%20Care%20Decarbonization_Road%20Map.pdf
- [84] P. Mattsson, T. Laike, and M. Johansson, "Factors affecting optimal lighting use in shared hospital environments: A case-study," *Build Environ*, vol. 96, pp. 28–37, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.11.026.

- [85] K. C. See, "Improving environmental sustainability of intensive care units: a mini-review," *World J Crit Care Med*, vol. 12, no. 4, pp. 217–225, 2023, [Online]. Available: <https://www.wjgnet.com/2220-3141/full/v12/i4/217.htm>
- [86] Building and Construction Authority Singapore, "EUROPEAN HEALTHCARE DESIGN 2017," Singapore, 2015.
- [87] M. H. E. A. L. Petrán, "Environmental Review 2023 Sustainable Development & Equal," Stockholm, 2023.
- [88] H. C. W. Harm, "Health Care Climate Council," 2024. [Online]. Available: <https://climatecouncil.noharm.org/>
- [89] P. M. V. Teixeira, "Eficiência Energética em Instalações Hospitalares," 2022.
- [90] H. U. Austral, "Programa Medioambiente," 2024. [Online]. Available: <https://www.hospitalaustral.edu.ar/quienes-somos/calidad-y-seguridad/medioambiente/>
- [91] H. U. Austral, "Premio por compras sostenibles," 2020. [Online]. Available: <https://www.hospitalaustral.edu.ar/2020/11/premio-para-el-hospital-austral-por-compras-sostenibles/>
- [92] G. in Future, "Khoo Teck Puat Hospital – Biophilic Design," 2018. [Online]. Available: https://greeninfuture.com/pdf/greenPulse_Jan2018.pdf
- [93] "A Beginner's Guide to Green Teams in the ICU," ANZICS and Intensive Care Society (UK), 2024. [Online]. Available: <https://anzics.org/wp-content/uploads/2022/04/A-beginners-guide-to-Sustainability-in-the-ICU.pdf>

