HACIA UNA SOSTENIBILIDAD INTEGRAL:

REFLEXIONES DESDE LA INTERDISCIPLINARIEDAD SOBRE USABILIDAD Y RIESGOS EN MATERIALES POLIMÉRICOS

Willmar Ricardo Rugeles Joya
Carlos Alfonso Devia Castillo
Angela Moncaleano
Carolina Valbuena
Henry Mendez

Palabras clave:
Sostenibilidad integral,
interdisciplinarieda,
usabilidad segura, diseño saludable.

Resumen

Este artículo de reflexión deriva de una investigación sobre emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles en materiales poliméricos de uso arquitectónico realizado por los autores. Se identifica una limitación fundamental en los enfoques convencionales de sostenibilidad: su mirada reduccionista centrada en el contenido reciclado omite la fase crítica de uso del material. A partir de datos empíricos, se evidencia que materiales promocionados como sostenibles pueden emitir contaminantes que representan riesgos para la salud humana, particularmente en contextos sociales vulnerables donde frecuentemente se aplican con estándares de calidad inferiores.

Se propone el concepto de usabilidad sistémica como marco integral que trasciende las evaluaciones técnicas tradicionales al incorporar dimensiones éticas y sociales. Este enfoque interdisciplinario integra cuatro dimensiones fundamentales: perspectiva funcional y de diseño, análisis tecnológico, evaluación químico-toxicológica, y criterios de salud pública basados en los Determinantes Sociales de la Salud.

El análisis revela la existencia de una "brecha de sostenibilidad" donde los principios teóricos contrastan con implementaciones prácticas que perpetúan desigualdades. Como proyección, se plantean tres líneas de acción urgentes: transformación curricular en educación superior, desarrollo de instrumentos normativos con etiquetado integral, e investigación futura con metodologías mixtas que correlacionen desgaste material con toxicidad en contextos vulnerables. El artículo concluye que la verdadera sostenibilidad requiere abordar los materiales como sistemas socio-técnicos complejos, posicionando la protección de la salud humana y la justicia social como criterios centrales en la evaluación y aplicación de materiales en el entorno construido.

Nota: Este artículo de reflexión se deriva críticamente del proyecto de investigación citado (Tello et al., 2023). Mientras el proyecto original se centra en la presentación de datos empíricos y metodología experimental, el presente texto se posiciona como una interpretación teórica y un marco conceptual derivado de dichos hallazgos, con un enfoque, estructura y contribución al conocimiento sustancialmente diferentes.

Introducción

En las últimas décadas, la creciente conciencia ambiental ha posicionado a la sostenibilidad como un paradigma central en la arquitectura y el diseño. Esto se ha traducido en una proliferación de materiales promocionados como "verdes" o "ecológicos", frecuentemente basados en contenidos reciclados o en procesos de producción que aparentan menor impacto ambiental. En países como Colombia, esta tendencia se ha materializado en una oferta creciente de viviendas, mobiliario y equipamientos para espacios educativos y laborales dirigidos a poblaciones de bajos recursos, presentándose como solución accesible a problemas de vivienda y como contribución a la reducción de residuos.

Sin embargo, este discurso predominante en torno a la sostenibilidad material generalmente adolece de una mirada reduccionista. Se centra predominantemente en el origen del material (reciclado) o en su destino final (biodegradable o reciclable), creando lo que podríamos denominar una narrativa del ciclo cerrado que, si bien necesaria, resulta insuficiente al momento de proponer soluciones que se integren en procesos productivos sostenibles. Esta narrativa invisibiliza una fase crítica: la usabilidad del producto en los espacios construidos durante su periodo funcional. Es aquí donde emerge la paradoja central que motiva esta reflexión: ¿qué sucede cuando una solución presentada comoambientalmente responsable genera riesgos no previstos para la salud de sus usuarios? Este artículo de reflexión surge como un ejercicio crítico a partir de los hallazgos del proyecto de investigación "Compuestos Orgánicos Volátiles en Materiales Poliméricos Sostenibles de Uso Arquitectónico e Interiores", realizado en la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. Dicho estudio, de carácter empírico, se concentró en medir y cuantificar las emisiones de COVs de materiales como ABS, PVC, madera plástica, vinilos y polialuminios. El presente texto busca utilizar los resultados de dicho estudio como evidencia para construir una argumentación teórica y metodológica. Nuestro objetivo es, por tanto, replantear los límites del concepto de sostenibilidad aplicado a materiales, proponiendo la adopción de un marco de evaluación interdisciplinario que tenga en la usabilidad segura su criterio aglutinador. Partimos de la hipótesis de que sin esta mirada integral, las prácticas actuales de diseño y construcción con materiales "sostenibles" pueden estar generando externalidades negativas sobre la salud humana que contradicen su propio propósito fundacional.

Marco Teórico

La evaluación convencional de materiales sostenibles ha operado bajo un paradigma reduccionista que privilegia atributos técnicos aislados (Schoenung et al., 2023), particularmente las capacidades de recuperación en ciclos biológicos o tecnológicos. El Análisis del Ciclo de Vida (LCA), metodología predominante, "típicamente no aborda los aspectos económicos o sociales" (ISO, 2006 citado en Zimek et al., 2019), resultando en evaluaciones fragmentadas.

Esta perspectiva resulta éticamente insuficiente al omitir las dimensiones sociales y de salud pública. La dimensión social de la sostenibilidad constituye el componente más subdesarrollado (Kohon, 2018; Vallance et al., 2011), y su exclusión puede considerarse socialmente irresponsable (Weidema et al., 2018 citado en Bozeman et al., 2022). Históricamente, esta omisión ha generado consecuencias negativas como segregación y aumento de inequidades en salud (Fullilove, 2004; Jacobs, 1961 citados en Kohon, 2018).

Se propone un marco teórico fundamentado en la usabilidad sistémica, que trasciende las miradas disciplinares aisladas (Barile et al., 2014) mediante pensamiento sistémico (Schoenung et al., 2023). Este concepto requiere ver el mundo como sistema interconectado (Gianni et al., 2017 citado en Zimek et al., 2019) y se define como la capacidad de un material de desempeñar su función temporalmente dentro de un contexto de acción social (Ågerfalk & Eriksson, 2006).

La usabilidad como propiedad emergente de interacciones entre usuarios, productos y entornos (Duffy, 2014) se alinea con la equidad sistémica, requiriendo administración simultánea de recursos (equidad distributiva), políticas (equidad procedimental) y necesidades culturales (equidad de reconocimiento) de poblaciones marginadas (Bozeman et al., 2022). El marco de los Determinantes Sociales de la Salud ofrece estructura integral para abordar factores estructurales que influyen en la salud poblacional, siendo crucial para el desarrollo sostenible (Kohon, 2018).

La evaluación de materiales sostenibles requiere una perspectiva explícita de acción social, donde la usabilidad se defina por la aceptabilidad social del sistema (Ågerfalk & Eriksson, 2006). Históricamente, la omisión del contexto social ha generado inequidades en salud y vulnerabilidad (Fullilove, 2004; Jacobs, 1961 citados en Kohon, 2018). Los materiales deben considerarse riesgos potenciales dado su

"potencial de contaminar" (Graedel citado en Duffy, 2014) o causar daño (Cranor, 2011).
Este marco integra dimensiones técnicas y sociales mediante:

a

1. Perspectiva funcional y de diseño, que contextualiza la aplicación material considerando usuarios, objetivos y contexto específico (ISO 9241-11 citado enQuesenbery, 2001), equilibrando eficiencia instrumental con validez social (Ågerfalk & Eriksson, 2006).

2. Análisis tecnológico, que evalúa durabilidad y evolución de propiedades, considerando fiabilidad y mantenibilidad (Duffy, 2014) mientras previene la degradación moral y social (Grădinaru et al., 2022).

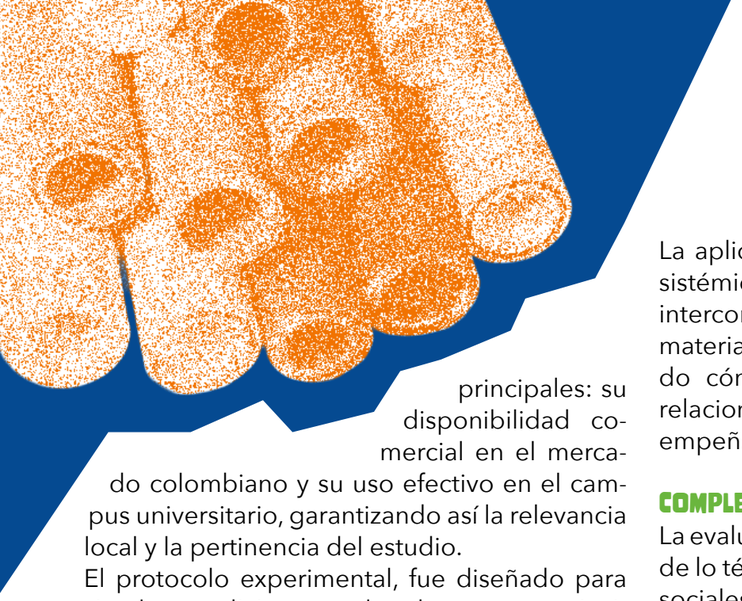
3. Evaluación química y toxicológica, que cuantifica emisiones mediante Química Verde (Duffy, 2014) y evaluación de riesgos (Schoenung et al., 2023).

4. Criterio de salud pública, que establece límites de exposición priorizando grupos vulnerables mediante el marco de Determinantes Sociales de la Salud (Kohon, 2018).

Esta integración revela que la sostenibilidad emerge dinámicamente en la interrelación material-entorno-usuario (Barile et al., 2014), evidenciando una paradoja crítica: mientras los materiales se promueven para contextos vulnerables, su evaluación omite calidad y afectación la salud. Esta contradicción refleja la brecha de sostenibilidad, donde los principios éticos contrastan con implementaciones deficientes, obligando a profesionales a depender de información de mercado en lugar de evaluaciones objetivas.
Se evidencia una peligrosa tendencia a justificar el uso de materiales en entornos vulnerables basándose únicamente en su condición de "sostenibles" o "reciclables", argumento raramente empleado con igual énfasis en otros ámbitos constructivos. Esta situación constituye una "brecha de sostenibilidad" (Steig citado en Stark & Cudhea, 2010), donde la alta valoración teórica de aspectos éticos contrasta con implementaciones deficientes (Otto et al., 2021), normalizando un doble estándar que perpetúa desigualdades al proveer materiales de inferior calidad a poblaciones desfavorecidas. Los profesionales, carentes de herramientas objetivas, dependen de información de mercado (Stark & Cudhea, 2010).
El paradigma propuesto trasciende los modelos técnicos (Barile et al., 2014) para enfocarse en el impacto material sobre la calidad de vida, salud y dignidad humana (Haslam & Waterson citado en Duffy, 2014; Schoenung et al., 2023), estableciendo la ética de la responsabilidad social como principio rector (Weidema et al., 2018).
La Ingeniería Verde busca diseñar materiales "benignos para la salud humana y ambiental" (Duffy, 2014), minimizando impactos adversos en sistemas ambientales esenciales para el bienestar humano (Schoenung et al., 2023).
Esta reorientación exige adoptar marcos basados en complejidad y técnicas como el Enfoque de Sistemas Viables para superar visiones reduccionistas. La equidad sistémica requiere gestionar simultáneamente recursos (equidad distributiva), políticas (equidad procedimental) y necesidades culturales de poblaciones marginadas (equidad dereconocimiento) (Bozeman et al., 2022), mediante investigación multidisciplinaria que combine métodos cuantitativos y cualitativos. Así, la sostenibilidad se convierte en compromiso verificable con el bienestar humano y justicia social.

Caso de Estudio

Para anclar esta reflexión teórica en la realidad material, tomamos como referencia los métodos y hallazgos clave de nuestro proyecto de investigación anterior. Dicho estudio se diseñó desde su concepción con un enfoque interdisciplinario, reuniendo a especialistas en diseño, ingeniería, química y estudios ambientales.
El núcleo metodológico fue el diseño y la construcción de un prototipo de cámara de medición de COVs, una cámara cerrada de vidrio y nylon donde se acoplaron sensores específicos para medir en tiempo real concentraciones de CO, CO2, NO2, NH3 y material particulado (PM1, PM2.5, PM10). La selección de los materiales de estudio se realizó bajo dos criterios



principales: su disponibilidad comercial en el mercado colombiano y su uso efectivo en el campus universitario, garantizando así la relevancia local y la pertinencia del estudio.

El protocolo experimental, fue diseñado para simular condiciones reales de uso y envejecimiento acelerado. Las muestras fueron sometidas a diferentes ambientes (luz natural directa, sombra interior, luz artificial directa, etc.) y a tres variables de manipulación: exposición directa, simulación de desgaste mecánico y exposición en condición húmeda. Este diseño no solo buscaba medir emisiones en estado basal, sino, crucialmente, entender cómo la usabilidad podía alterar el perfil de emisiones de los materiales.

Si bien el resultado original se centró en la presentación tabular y descriptiva de los datos de concentración y sus correlaciones con los análisis físico-mecánicos, los datos empíricos nos sirven para precisamente elevar la discusión a la necesidad del marco interdisciplinario que aquí proponemos.

Análisis y Discusión

La aplicación del marco teórico de usabilidad sistémica a los datos del caso de estudio revela interconexiones críticas entre las propiedades materiales y sus impactos sociales, evidenciando cómo la evaluación convencional oculta relaciones esenciales para comprender el desempeño real en contextos vulnerables.

COMPLEJIDAD Y ÉTICA

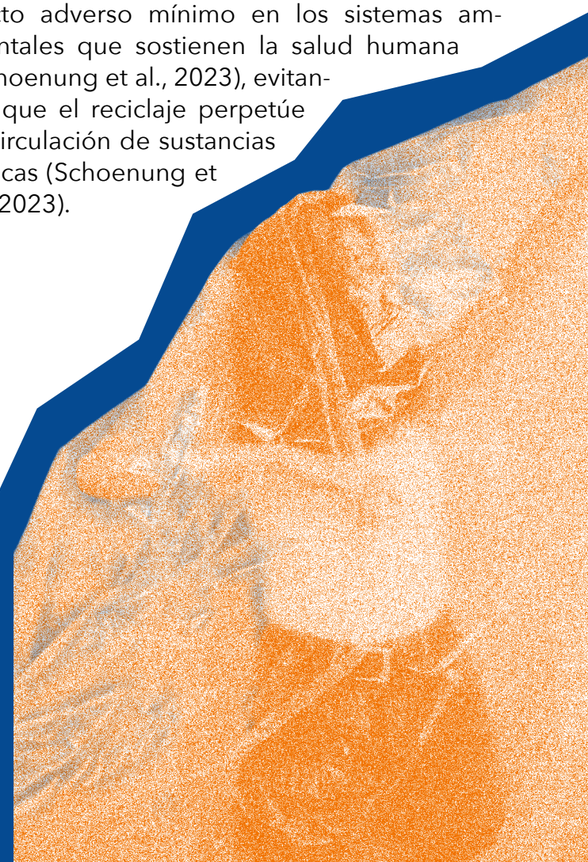
La evaluación material contemporánea trasciende lo técnico al incorporar dimensiones éticas y sociales fundamentales (Otto et al., 2021), reconociendo la sostenibilidad como proceso dinámico vinculado a la viabilidad sistémica (Barile et al., 2014). Esta complejidad exige articular metodologías cuantitativas y cualitativas mediante procesos iterativos que capturen tanto el comportamiento físico-químico como el impacto diferencial en poblaciones vulnerables. La investigación multidisciplinaria y herramientas como el Análisis del Ciclo de Vida Social (Bozeman et al., 2022) requieren marcos metodológicos mixtos (Zimek et al., 2019). La triangulación metodológica emerge como esencial para validar resultados y establecer correlaciones entre características estructurales, patrones de degradación y perfiles de emisión en contextos socialmente sensibles. Este enfoque revela cómo propiedades técnicamente aceptables pueden convertirse en riesgos inaceptables bajo condiciones de vulnerabilidad social, destacando la importancia de la Ingeniería Verde para diseñar materiales benignos para la salud humana. La exclusión de datos sociodemográficos ha contribuido a desigualdades mediante decisiones ineficaces (Bozeman et al., 2022), subrayando la necesidad de prevención en el origen del producto y proceso (Duffy, 2014).

USABILIDAD SISTÉMICA

El concepto de usabilidad sistémica integra justicia ambiental y equidad social (Kohon, 2018), articulándose mediante la administración simultánea de recursos (equidad distributiva), políticas (equidad procedimental) y necesidades culturales (equidad de reconocimiento) (Bozeman et al., 2022). Esta matriz superaría visiones reduccionistas mediante modelos predictivos empleando métodos como Dinámica de Sistemas (Bank et al., 2011) y Análisis de Ciclo de Vida Social (Url et al., 2025). La implementación de este enfoque promueve caracterizaciones integrales donde las propiedades técnicas garantizan salubridad y durabilidad mínimas y combaten la obsolescencia prematura (Grădinaru et al., 2022), estableciendo un compromiso verificable con la justicia social (Kohon, 2018).

SOSTENIBILIDAD ÉTICA Y RESPONSABLE

La aplicación de este marco conceptual impulsa la transición hacia paradigmas de sostenibilidad fundamentados en la responsabilidad ética y la justicia social. Es crucial comprender que la sostenibilidad exige materiales con impacto adverso mínimo en los sistemas ambientales que sostienen la salud humana (Schoenung et al., 2023), evitando que el reciclaje perpetúe la circulación de sustancias tóxicas (Schoenung et al., 2023).



La generación de meta-inferencias mediante diseños de integración múltiple permite desarrollar herramientas de especificación que incorporen criterios técnicos y sociales, así como marcos regulatorios basados en evidencias interdisciplinares (Schoenung et al., 2023). Este enfoque sistémico supera las evaluaciones fragmentadas (Onat et al., 2017) mediante investigación multidisciplinaria que integra métodos cuantitativos y cualitativos (Schoenung et al., 2023), utilizando el marco de los Determinantes Sociales de la Salud para abordar factores estructurales que influyen en el bienestar (Kohon, 2018).

El paradigma emergente establece las bases para una toma de decisiones fundamentada en la ética de la responsabilidad social (Weidema et al., 2018), posicionando la protección de la salud comunitaria y la dignidad humana como criterios centrales. La usabilidad sistémica promueve la equidad mediante la gestión simultánea de recursos, políticas y necesidades culturales de poblaciones marginadas (Bozeman et al., 2022), garantizando que el discurso ambiental no perpetúe desigualdades y abordando así la "brecha de sostenibilidad" entre teoría y práctica (Otto et al., 2021; Stark & Cudhea, 2010).

Conclusiones

La investigación original sobre COVs en materiales poliméricos proporcionó datos cuantitativos esenciales, pero la reflexión interdisciplinaria derivada de este estudio revela implicaciones más profundas para la conceptualización de la sostenibilidad en materiales de construcción. La principal lección es que la sostenibilidad real es inherentemente interdisciplinaria y éticamente fundamentada, pues los materiales en el espacio construido constituyen ensamblajes complejos donde convergen propiedades físicas, químicas y dimensiones sociales que no pueden evaluarse de forma aislada.

La fase de uso del material constituye una dimensión crítica sistemáticamente subvalorada en los paradigmas convencionales de sostenibilidad. La usabilidad, como propiedad emergente de las interacciones entre usuarios, productos y entornos (Duffy, 2014; Ågerfalk & Eriksson, 2006), revela que ignorar esta fase implica asumir riesgos invisibles para la salud humana que pueden contrarrestar los beneficios ambientales del reciclaje. La usabilidad sistémica emerge como herramienta conceptual esencial para integrar esta fase, exigiendo evaluaciones que consideren tanto objetivos instrumentales como sociales y confronten el doble estándar que normaliza materiales de menor calidad en contextos vulnerables. Este enfoque posiciona la protección del bienestar humano como criterio central (Schoenung et al., 2023).

Como proyección de esta reflexión, se identifican tres líneas de acción urgentes:

1. Para la academia:
Es importante ajustar los currículos de diseño, arquitectura e ingeniería para incorporar la alfabetización en justicia ambiental y salud pública. Los futuros profesionales deben desarrollar competencias para interpretarcríticamente la sostenibilidad y evaluar los impactos sociales diferenciales de los materiales, integrando el principio de precaución en sus procesos de decisión.

2. Para la investigación futura:
Es crucial avanzar en metodologías mixtas que correlacionen la información técnica de materiales con sus implicaciones sociales,con especial atención a contextos de vulnerabilidad social.

Este artículo constituye un llamado a trascender las definiciones simplistas de sostenibilidad y a abrazar la complejidad de los materiales contemporáneos desde un enfoque interdisciplinario y éticamente responsable, garantizando que los espacios que habitamos sean no solo eficientes en recursos, sino también promotores de salud, bienestar y justicia social

Nota: Revisión ortográfica y de estilo realizado con AI Deepseek

Referencias Bibliográficas

Ågerfalk, P. J., & Eriksson, O. (2006). Socio-instrumental usability: It is all about social action. Journal of Information Technology, 21(1), 24–37.

Bozeman, J. F., III, Nobler, E., Nock, D., & Wang, Q. (2022). A Path Toward Systemic Equity in Life Cycle Assessment and Decision-Making: Standardizing Sociodemographic Data Practices. Environmental Justice, 15(7), 760–770.

Cranor, C. F. (2011). Legally Poisoned: How the Law Puts Us at Risk from Toxicants. Harvard University Press, Cambridge, MA.

Duffy, V. G. (2014). Improving Sustainability through Usability. En V. G. Duffy (Ed.), Advances in Ergonomics and Human Factors (pp. 509–519). Springer.

Grădinaru, C. Ş., Pantilimon, M. C., Grecu, A., Berbecaru, A. C., Sohaciu, M. G., Predescu,C., & Nicolae, A. (2022). Eco-Socio-Technological Degradation of the Metallic Materials. U.P.B. Scientific Bulletin, Series B, 84(2), 155–164.

Kohon, J. (2018). Interpreting the Social Dimension of Sustainability: Connecting Theory and Community Planning Practice with a Social Determinants of Health Framework. The International Journal of Sustainability in Economic, Social and Cultural Context, 14(4), 11– 24.

Onat, N., Kucukvar, M., Halog, A., & Cloutier, S. (2017). Systems Thinking for Life Cycle Sustainability Assessment: A Review of Recent Developments, Applications, and Future Perspectives. Sustainability, 9(1), 1–25.

Otto, I., Kahrass, H., & Mertz, M. (2021). "Same same but different"? On the questionable but crucial differentiation between ethical and social aspects in health technology assessment. Z. Evid. Fortbild. Qual. Gesundh. wesen (ZEFQ), 164, 1–10.

Quesenbery, W. (2001). Balancing the 5Es: Usability. Journal of Information Technology. Schoenung, J. M., & Olivetti, E. A. (2023). MRS Bull. 48(4), 362.

Stark, R., & Cudhea, P. (2010). [Título no especificado]. Eco-Architecture III, 527–534. Url, P., Orgler, M., Larsen, R. B., & Vorraber, W. (2025). Visualization of Social Life Cycle Assessment and Ethics Audit Outcomes in the Context of a Circular Manufacturing Ecosystem. Tehnički Glasnik, 19(2), 106–111.

Vallance, S., Perkins, H. C., & Dixon, J. E. (2011). What is Social Sustainability? A Clarification of Concepts. Geoforum, 42(3), 342–48.

Weidema, B. P., Pizzol, M., Schmidt, J., & Thoma, G. (2018). Attributional or consequential Life Cycle Assessment: A matter of social responsibility. Journal of Clean Production, 174, 305–314.

Zimek, M., Schober, A., Mair, C., Baumgartner, R. J., Stern, T., & Füllsack, M. (2019). The Third Wave of LCA as the "Decade of Consolidation". Sustainability, 11(12), 3283.