

GESTIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL APOYADA EN IOT: EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL EN EL QUINDÍO, COLOMBIA

CORPORATE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT SUPPORTED BY IOT: ECONOMIC AND SOCIAL ASSESSMENT IN QUINDÍO, COLOMBIA

Adriana María Flórez Laiseca¹, Paola Andrea Loaiza Trejos²
& Sebastián Ospina Reyes³

Resumen

El presente artículo se deriva del proyecto de investigación denominado “Diseñar e Implementar un modelo de captura de datos escalable a partir de dispositivos IoT ajustado a las normas ISO 14064 (Huella de carbono) e ISO 14046 (Huella hídrica) y estudio de factibilidad para masificación”. El objeto fue evaluar el impacto social y económico del uso de dispositivos de internet de las cosas (IoT) en la gestión ambiental de las empresas en el Quindío. Las tecnologías IoT empleadas para medir huella de carbono e hídrica pueden facilitar el cumplimiento normativo y propiciar beneficios económicos y tributarios para las empresas que los empleen. Con el fin de determinar su viabilidad, se estiman indicadores como el Valor Actual Neto Social (VANS) y el Índice de Costo-Beneficio Social (ICBS) sobre las empresas. Los resultados sugieren que el proyecto es socialmente rentable, contribuyendo a la reducción de emisiones de CO₂, el ahorro de recursos hídricos y mejoras en la calidad de vida. Entre los hallazgos más representativos se encuentra la evaluación de la integración del sistema IoT con el marco de gobernanza ambiental más amplio y la generación de modelos de incentivos financieros óptimos para PYMES en la instalación de sistemas de monitoreo de gestión ambiental.

Palabras Clave: Internet de las cosas (IoT), gestión ambiental, sostenibilidad empresarial, huella de carbono, huella hídrica.

Abstract

The present article is derived from the research project titled “Designing and Implementing a Scalable Data Capture Model based on (IoT), adjusted to ISO 14064 (Carbon Footprint) and ISO 14046(Water Footprint) standards, and a Feasibility Study for Massification.” The primary objective of this study was to evaluate the social and economic impact stemming from the use of Internet of Things (IoT) devices in the corporate environmental management of companies located in Quindío. Consequently, the implementation of (IoT) technologies designed to measure carbon and water footprints can substantially facilitate regulatory compliance and, furthermore, generate significant economic and tax benefits for the businesses that adopt them.

To precisely determine the viability of this initiative, key indicators such as the Social Net Present Value (SNPV) and the Social Cost-Benefit Index (SCBI) are estimated for the participating companies. The results obtained consistently suggest that the project is socially profitable, contributing effectively to the reduction of CO₂ emissions, the saving of water resources, and overall improvements in the quality of life within the region. Among the most representative findings is the comprehensive evaluation of the integration between the proposed (IoT) system and the broader environmental governance framework, alongside the generation of optimal financial incentive models tailored for (SMEs) to facilitate the installation of these environmental management monitoring systems.

Keywords: Internet of Things (IoT), environmental management, business sustainability, carbon footprint, water footprint, cost-benefit ratio, sustainable development.

¹ Economista, Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Directora programa de Economía Universidad del Quindío, Programa de Economía, Grupo de Investigación Economía, Ambiente y Sociedad, <https://orcid.org/0000-0003-1439-1236>, Armenia, Colombia, amflorez@uniquindio.edu.co

² Economista, Magister en Economía. Profesor Investigador Corporación Universitaria Minuto de Dios(UNIMINUTO),ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2431-1642>, Armenia, Colombia, paola.loaiza-tr@uniminuto.edu.co

³ Economista, Universidad del Quindío, Programa de Economía, <https://orcid.org/0000-0004-2432-1512> Armenia, Colombia. sebastian.ospinar@uqvirtual.edu.co

1. Introducción

El presente artículo evaluó la viabilidad social y económica de implementar dispositivos del Internet de las Cosas (IoT) en las empresas con el objetivo de llevar a cabo el seguimiento de su huella hídrica y huella de carbono. Los dispositivos IoT han ganado importancia, dado que tienen la posibilidad de hacer simples procesos que suelen ser complejos, garantizando así mayor eficiencia en los sistemas y permitiendo contar con herramientas inteligentes y multifuncionales para la reducción de la contaminación del aire y la optimización del uso del recurso hídrico (Zhao *et al.*, 2020). Sumado a esto, la implementación de dispositivos en las empresas puede convertirse en un mecanismo determinante en el cumplimiento de las regulaciones ambientales que cada vez presentan un mayor reto a nivel nacional e internacional, dentro de los cuales se encuentran el Acuerdo de París y la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Departamento Nacional de Planeación, 2022).

El constante aumento en la demanda de bienes escasos hace cada vez más apremiante la necesidad de gestionar de manera eficiente los materiales y recursos disponibles (Abdulrahman *et al.*, 2024) con el propósito de fortalecer la sostenibilidad ambiental. En este contexto, la implementación de tecnologías innovadoras como el Internet de las Cosas (IoT) en la gestión ambiental empresarial se perfila como una oportunidad estratégica para alinear los objetivos corporativos con las metas de desarrollo sostenible y la normatividad ambiental vigente. Al evaluar los impactos sociales y económicos de estas tecnologías en las empresas del Departamento del Quindío se facilita el cumplimiento de normativas ambientales como la Ley 1.931 de 2018 que contiene directrices para la gestión del cambio climático y la Resolución 1.447 de 2018 que genera medidas en torno al monitoreo y verificación de emisiones, alineando los objetivos corporativos y las prácticas empresariales responsables.

En este sentido, se realizó una evaluación económica y social de la implementación de dispositivos IoT en la gestión ambiental empresarial, con el fin de determinar su viabilidad y el impacto que pueden generar en el desarrollo sostenible. Para ello, se emplearon indicadores como el Valor Actual Neto Social (VANS) y el Índice de Costo-Beneficio social (ICBS) (Leistritz & Murdock, 1981), los cuales permiten cuantificar los beneficios económicos y sociales asociados a la medición de emisiones de CO₂, así como la optimización y posible reducción en el uso de recursos hídricos, lo que se transmitiría en la mejora en la calidad de vida de las comunidades. La evaluación no solo proporcionó información relevante para la toma de decisiones empresariales, sino que también sugirió retroalimentaciones que orientan la formulación de políticas públicas e incentivos tributarios que promuevan la adopción de estas tecnologías en el sector productivo del Quindío facilitando la alineación de las organizaciones con la normatividad ambiental vigente y los compromisos internacionales en materia de sostenibilidad (Vedung, 1997).

De acuerdo con esto, se buscó establecer **¿Cuál es la viabilidad social y económica de implementar tecnologías IoT en la gestión ambiental empresarial en el departamento del Quindío, Colombia?**

Fundamentación Teórica

Estudios llevados a cabo a nivel global han tenido la posibilidad de demostrar que la implementación de dispositivos IoT en sistemas de monitoreo ambiental pueden reducir de manera significativa los costos operativos y de esta manera mejorar la calidad de vida en entornos urbanos (Lazarescu, 2014), mientras que, en países en vía de desarrollo, innovaciones basadas en dispositivos IoT para la gestión de residuos han probado ser económicamente viables y socialmente aceptadas (Fidje *et al.*, 2023). Sumado a esto, se encuentran estudios que destacan los dispositivos IoT para fomentar la sostenibilidad ambiental en pequeñas y medianas empresas (PYMES), generando de esta forma beneficios económicos como la eficiencia energética y beneficios sociales como la creación de empleo en sectores verdes (Phasinam *et al.*, 2022).

La gestión ambiental se apoya en la normatividad para reducir los impactos y disminuir el uso de recursos naturales. En Colombia, la ley 99 de 1993 fue clave para la creación del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, a su vez, permitió establecer políticas y marcos normativos para la gestión y el control ambiental. Además, acuerdos internacionales como el Acuerdo de París y la Agenda 2030 que han fomentado la integración de la sostenibilidad en las estrategias empresariales, promoviendo el cumplimiento de estándares internacionales en materia de gestión ambiental (Jones *et al.*, 2016).

Además de las regulaciones, la implementación de herramientas de monitoreo y control resulta clave en la gestión ambiental para evaluar los efectos de las actividades económicas en el medio ambiente (Lovett *et al.*, 2007). La posibilidad de emplear tecnologías emergentes como el IoT pueden facilitar la recopilación de datos en tiempo real, optimizando la toma de decisiones en el ámbito empresarial y gubernamental (Bacco *et al.*, 2017). Por lo tanto, la gestión ambiental no solo se convierte en un componente esencial del desarrollo sostenible, sino que presenta una oportunidad para la innovación y la mejora en la eficiencia de los procesos productivos.

Así mismo, la gestión ambiental cobra mayor relevancia por el cambio climático y sus efectos globales adversos, como el aumento de las temperaturas, la pérdida de biodiversidad y los eventos climáticos extremos, con grandes impactos para los ecosistemas y la economía (Petel *et al.*, 2021). Es una estrategia útil para mitigar estos impactos mediante regulaciones, control de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y uso óptimo del agua. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) señala que la eficiencia energética, las energías renovables y la optimización de recursos son clave para reducir la huella ambiental en los sectores productivos (Maldonado, 2022).

Además, el sector empresarial juega un rol determinante en la gestión ambiental, ya que adoptar prácticas sostenibles mejora la eficiencia operativa y reduce los costos de consumo de recursos (Alberti *et al.*, 2000). La implementación de certificaciones es una estrategia efectiva para integrar la sostenibilidad en los procesos productivos y fomentar una cultura organizacional orientada a la mitigación del cambio climático (Karaeva *et al.*, 2023). Así, la gestión ambiental se configura como una alternativa viable para enfrentar los desafíos

climáticos actuales, sino que también ofrece una ventaja competitiva a las empresas que buscan innovar en modelos de producción más sostenibles (Wang *et al.*, 2022).

La gestión ambiental haciendo uso de dispositivos IoT se refiere al uso de dispositivos inteligentes conectados que recopilan, procesan y transmiten datos en tiempo real para monitorear y optimizar el uso de recursos naturales y las emisiones contaminantes (Contreras & España, 2024). Hacer uso de estos dispositivos tecnológicos puede mejorar la manera en que hasta ahora las empresas y gobiernos enfrentan los desafíos ambientales, brindando datos precisos y oportunos que facilitan la toma de decisiones informadas (Netho *et al.*, 2023). De esta manera se elimina la necesidad de métodos tradicionales que son menos eficientes y fiables, sumado a esto, la información generada es accesible, propiciando identificar de manera sencilla la ineficiencia en el recurso hídrico o picos inusuales en las emisiones de CO₂, generando alertas automáticas que posibiliten tomar acciones correctivas de manera inmediata (Blanquicett *et al.*, 2024).

Entendiendo la importancia que representa la gestión ambiental en el cambio climático en distintos niveles, las herramientas que facilitan esto procesos son decisivos y los dispositivos IoT han ganado gran relevancia. Estos dispositivos permiten recopilar y analizar datos con variables ambientales asociadas a normas en tiempo real, para tomar decisiones focalizadas y eficientes (Mois *et al.*, 2017), por lo tanto, estos dispositivos empleados para el monitoreo de variables ambientales facilitan el seguimiento de la calidad del aire, el uso del agua y las emisiones de gases de efecto invernadero (Chojer *et al.*, 2020). Posterior a ello, Hsieh (2024) revela en un artículo de investigación que la implementación de estos dispositivos en contextos urbanos productivos puede reducir de manera significativa el consumo de energía y la generación de residuos, contribuyendo de esta forma a la sostenibilidad ambiental.

2. Metodología

El presente artículo evaluó la viabilidad socioeconómica de la implementación de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) para la cuantificación de la huella de carbono e hídrica en el departamento del Quindío, Colombia. La investigación se estructuró con el objetivo de generar evidencia que demuestre los beneficios netos derivados de la adopción de estas iniciativas en el ámbito empresarial.

Para fundamentar la evaluación y análisis, se llevó a cabo una recopilación exhaustiva de datos, articulada en dos ejes principales: los costos inherentes a la tecnología IoT y el perfil empresarial del Quindío. En lo referente a los costos, se investigaron los precios de adquisición, instalación, calibración, mantenimiento y licenciamiento de plataformas de gestión de datos para diversos dispositivos IoT relevantes en el monitoreo ambiental. Esto incluyó, por ejemplo, sensores de flujo de agua, medidores de consumo energético y sensores de calidad del aire, con el fin de obtener una visión integral de la inversión requerida.

De manera simultánea, se consolidó una base de datos empresarial específica para el Quindío, utilizando una combinación de fuentes primarias y secundarias, como el

Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE –, la Cámara de Comercio de Armenia e informes sectoriales pertinentes. Esta base de datos comprendió información detallada sobre el número de empresas por sector económico (agroindustria, manufactura, servicios, entre otros), su tamaño clasificado según criterios de ingresos y número de empleados (micro, pequeña, mediana, grande empresa), y su consumo histórico de recursos como agua y energía. Esta caracterización exhaustiva permitió estimar el universo potencial de adopción de la tecnología IoT y, consecuentemente, proyectar la escala de los beneficios. Adicionalmente, esta heterogeneidad empresarial fue considerada para afinar las proyecciones de impacto socioeconómico.

La evaluación de la viabilidad socioeconómica se ejecutó mediante un Análisis de Costo-Beneficio Social (ACBS). Este enfoque metodológico incorporó las externalidades y el impacto en la comunidad, trascendiendo los retornos financieros directos para los agentes económicos individuales.

La metodología se basó en la proyección de flujos de beneficios y costos a lo largo de un horizonte temporal definido, utilizando una tasa de descuento social (*r*) apropiada para la economía colombiana y el contexto regional del Quindío. Esta tasa reflejó el valor temporal del dinero desde una perspectiva societal, garantizando una evaluación holística del proyecto. Para cuantificar la rentabilidad social del proyecto, se utilizaron dos métricas clave:

El primero es el Valor Actual Neto Social (VANS), que se calculó como la suma de los valores presentes de los beneficios sociales netos esperados a lo largo del período de análisis. Un VANS positivo indica que el valor presente de los beneficios sociales excede el valor presente de los costos sociales, haciendo el proyecto socialmente deseable. Su formulación es:

$$\text{VANS} = \frac{B_t - C_t}{(1 + r)^t} \quad (1)$$

Donde;

B_t= Beneficios sociales brutos en el período *t*. Estos incluyen ahorros en recursos (agua, energía), reducción de emisiones de carbono, mejoras en la eficiencia operativa de las empresas, potenciales ingresos por mercados de carbono, y beneficios para la salud pública derivados de una mejor calidad ambiental.

C_t= Costos sociales brutos en el período *t*. Estos comprenden los costos de inversión inicial en hardware y software IoT, costos de instalación, mantenimiento recurrente, capacitación del personal, y costos de gestión de datos.

r = Tasa de descuento social

t = Período de tiempo considerado (0,1,...,n).

Un proyecto se considera socialmente rentable si $VANS>0$.

El Indicador Costo-Beneficio Social (ICBS) se estableció como un criterio de evaluación crucial, determinado por la razón entre el valor presente de los beneficios sociales totales y el valor presente de los costos sociales totales. Este indicador permite una clara validación de la inversión desde una perspectiva social: un ICBS superior a la unidad ($ICBS > 1$) demuestra que los beneficios sociales superan los costos sociales, confirmando la viabilidad y conveniencia del proyecto para la colectividad

$$ICBS = \frac{\frac{B_t}{(1+r)^t}}{\frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (2)$$

Si $ICBS > 1$, entonces el proyecto es viable.

3. Resultados

3.1. Costos de los dispositivos IoT y su implementación

La evaluación de la viabilidad socioeconómica inició con la cuantificación de los costos asociados a los dispositivos IoT para la medición de huella hídrica y de carbono. Para la medición de la huella hídrica, cada dispositivo tiene un costo de adquisición de 117\$ USD. A esto se suman una licencia anual de visualización, estandarización y almacenamiento de información de 84\$ USD, un costo de instalación de 70\$ USD, y gastos de mantenimiento y configuración de 35\$ USD y 7\$ USD, respectivamente, totalizando un costo inicial de 313\$ USD por dispositivo.

En cuanto a la medición de la huella de carbono, el dispositivo presenta un costo de 91\$ USD. La licencia para visualización, estandarización y almacenamiento de información es de 84\$ USD. Los costos de mantenimiento y configuración ascienden a 35\$ USD y 8.5\$ USD, respectivamente, lo que resulta en un costo total inicial de 218.5\$ USD por dispositivo. Es importante señalar que la cantidad de dispositivos requeridos por empresa para ambas mediciones está supeditada al área física de la entidad.

3.2. Proyección de dispositivos por tamaño de empresa

Para estimar el número de dispositivos a emplear por organización, se clasificaron las empresas del Quindío según su número de trabajadores: microempresas (1-10 empleados), pequeñas (11-50 empleados), medianas (51-200 empleados) y grandes (>200 empleados). Esta clasificación, en conjunto con las disposiciones del Gobierno Español sobre seguridad y salud en el trabajo (Real Decreto 486/1997, Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones Exteriores, 1997), permitió proyectar la distribución de dispositivos. Así, una microempresa (superficie mínima de 20 m²) y una pequeña empresa (100 m²) requerirían solo un dispositivo. Por su parte, las medianas (400 m²) y grandes empresas (600 m²)

necesitarían entre 3 y 5 dispositivos, respectivamente. Es relevante destacar que estos cálculos se basaron en el espacio mínimo por trabajador, excluyendo áreas comunes.

3.3. Composición del tejido empresarial y costos de implementación masiva

La composición del tejido empresarial en el Departamento del Quindío, según datos de la Cámara de Comercio de Armenia y del Quindío (CCAQ) al 31 de agosto de 2024, revela un total de 22.354 empresas. De estas, 21.608 son microempresas, 591 pequeñas, 124 medianas y 31 grandes (Registros públicos - Cámara de Comercio de Armenia y del Quindío, 2024). Con base en esta distribución, se estima que el costo total de la implementación de la medición de huella hídrica y de carbono ascendería a 8.782.389 \$ USD para el primer año. A partir del segundo año, el costo anual para mantenimiento y pago de suscripciones se proyecta en 1.336.125 \$ USD.

3.4. Escenario de proyecto y parámetros del análisis social

Considerando un escenario inicial con la participación de 50 empresas en el Departamento del Quindío y una duración proyectada de cinco años para el proyecto, el costo total de adquirir los dispositivos de medición de huella hídrica y de carbono por empresa se estima en \$2.378.967,42 COP (conversión basada en datos actuales). Se espera que esta medición resulte en una reducción anual de quince toneladas de CO₂ emitidas por empresa y una disminución del 5 % en la huella hídrica.

El valor social de la reducción de emisiones de carbono se fijó en 50.000 \$ COP por tonelada de CO₂, mientras que el ahorro en costos de agua se proyectó en 1.000.000 \$ COP por empresa al año. Adicionalmente, se estimó un impacto social extra de 500.000 \$ COP por empresa anualmente. La tasa social de descuento se estableció en 6 %, en concordancia con los estándares para proyectos sociales en América Latina.

La tabla 1 y la tabla 2 presentan la desagregación de los costos y beneficios sociales totales considerados en el análisis.

Tabla 1. Costos Sociales Totales

Costos Sociales Totales	\$ 118.948.371,20
Costos Operativos Totales	\$ 15.665.825,00
Costos indirectos de capacitación y sensibilización	\$ 50.000,00
Costo social total	\$ 447.277.496,20

Fuente: Elaboración de los Autores

Tabla 2. Beneficios Sociales Totales

Reducción de emisiones de CO2	750 ton CO2 por año
Pago por reducción de emisiones	\$ 206.250.000
Ahorro en los costos de agua	\$ 300.000.000
Impacto social en factores como salud, educación e imagen corporativa	\$ 400.000.000
Beneficio social total	\$ 906.250.000

Fuente: Elaboración de los Autores

Aplicando; 447.277.496,2

$$VANS = \frac{B_t - C_t}{(1 + r)^t} \quad (3)$$

Costo Social Total Anual

$$C_t = \frac{447.227.496,2}{5} = \$89.445.499,24 \quad (4)$$

Beneficio Social Total Anual

$$B_t = \frac{906.250.000}{5} = \$181.250.000 \quad (5)$$

La tasa social de descuento, 6 %

Duración del proyecto, cinco años

$181.250.000 - 89.445.499,24 = 91.804.500$, 7 por año.

$$VANS = \frac{91.804.500,7}{(1+6\%)^0} + \frac{91.804.500,7}{(1+6\%)^1} + \frac{91.804.500,7}{(1+6\%)^2} + \frac{91.804.500,7}{(1+6\%)^3} + \frac{91.804.500,7}{(1+6\%)^4} + \frac{91.804.500,75}{(1+6\%)^5} \quad (6)$$

$$= 478.518.454,8$$

El resultado de la VANS es positivo, lo que sugiere que, bajo las condiciones anteriormente planteadas, el proyecto genera un retorno social neto positivo. Esto significa que el beneficio social supera el costo social considerando una tasa social de descuento del 6 %.

Aplicando,

$$ICBS = \frac{\frac{B_t}{(1+r)^t}}{\frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (7)$$

Cálculo de los beneficios descontados

$$t_0 = \frac{181.250.000}{(1.06)^0} = 181.250.000$$

$$t_1 = \frac{181.250.000}{(1.06)^1} = 171.462.264$$

$$t_2 = \frac{181.250.000}{(1.06)^2} = 161.746.472$$

$$t_3 = \frac{181.250.000}{(1.06)^3} = 152.119.311 \quad (8)$$

$$t_4 = \frac{181.250.000}{(1.06)^4} = 142.597.470$$

$$t_5 = \frac{181.250.000}{(1.06)^5} = 133.197.699$$

Total, de beneficios descontados = \$942.373.216

Cálculo de los costos descontados

$$\frac{C_t}{(1 + r)^t} \quad (9)$$

Para cada año t ,

$$t_0 = \frac{\$89.445.499,24}{(1.06)^0} = 89.445.499,24$$

$$t_1 = \frac{\$89.445.499,24}{(1.06)^1} = 84.382.546,45$$

$$t_2 = \frac{\$89.445.499,24}{(1.06)^2} = 79.606.175,9$$

$$t_3 = \frac{\$89.445.499,24}{(1.06)^3} = 75.100.165,94$$

$$t_4 = \frac{\$89.445.499,24}{(1.06)^4} = 70.849.213,15$$

$$t_5 = \frac{\$89.445.499,24}{(1.06)^5} = 66.838.880,33$$

Total costos descontados = 466.222.481,01COP

$$ICBS = \frac{942.373.216}{466.222.841,01} = 2.021 \quad (10)$$

El comportamiento del ICBS indica que por cada peso que se invierte, se genera un retorno social neto de 2.021 \$ COP, permitiendo inferir que el proyecto es socialmente viable bajo los parámetros establecidos.

4. Discusión

La implementación de dispositivos del Internet de las Cosas (IoT) en la gestión ambiental empresarial, específicamente para la cuantificación de la huella de carbono y hídrica en el Departamento del Quindío, revela oportunidades significativas para la mejora de la sostenibilidad y el cumplimiento normativo existente. Los resultados de la evaluación económica y social confirman que este tipo de iniciativas son socialmente viables, respaldadas por un Valor Actual Neto Social (VANS) positivo de 478,518,454.8 \$ COP y un Índice de Costo-Beneficio Social (ICBS) de 2.021. Esto sugiere que, por cada peso invertido, se genera un retorno social neto de 2.021 pesos, lo que subraya la rentabilidad social del proyecto bajo los parámetros establecidos.

En este sentido, la adopción de tecnologías IoT se traduce en beneficios tangibles, tales como la reducción de emisiones de CO₂, el ahorro en el consumo de recursos hídricos y la mejora de la imagen corporativa de las empresas. Estos impactos, a su vez, contribuyen positivamente a la calidad de vida y al bienestar social de las comunidades. La capacidad de los dispositivos IoT para recopilar y analizar datos ambientales en tiempo real es crucial, ya que permite una toma de decisiones focalizada y eficiente, optimizando el seguimiento de la calidad del aire, el uso del agua y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estudios globales, como los de Lazarescu (2014) y Fidje *et al.* (2023).

Lo anterior, refuerza esta perspectiva, demostrando que los sistemas de monitoreo ambiental basados en IoT pueden reducir costos operativos y mejorar la calidad de vida en entornos urbanos, siendo además económicamente viables y socialmente aceptados en países en desarrollo. Asimismo, Hsieh (2024) revela que la implementación de estos dispositivos en contextos urbanos productivos puede reducir significativamente el consumo de energía y la generación de residuos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

No obstante, es imperativo reconocer y abordar los desafíos inherentes a la implementación masiva de estas tecnologías. El costo inicial de adquisición de los dispositivos y los gastos operativos recurrentes, que ascienden a 8,782,389 \$ USD para el primer año y 1,336,125 \$ USD anualmente a partir del segundo, pueden representar una barrera significativa para la adopción, especialmente en el segmento de micro, pequeñas y medianas empresas. Además, la eficacia del monitoreo y la recopilación de datos podría verse limitada por la capacidad técnica y la infraestructura existente. Por consiguiente, resulta esencial la implementación de programas de capacitación y sensibilización que fortalezcan la adopción y el uso efectivo de estas tecnologías en el ámbito local.

El análisis subraya la función catalizadora del sector público como facilitador. La generación de un marco normativo que incentive la participación del sector privado y la promoción de alianzas público-privadas son fundamentales para permitir que

empresas con menor capacidad adquisitiva se sumen a esta iniciativa. Un ejemplo de este tipo de articulación se observa en la Ley 1.931 de 2018 y la Resolución 1.447 de 2018 en Colombia, las cuales establecen directrices para la gestión del cambio climático y la verificación de emisiones, respectivamente, alineando así los objetivos corporativos con las prácticas empresariales responsables. Además, la coherencia con acuerdos internacionales como el Acuerdo de París y la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) asegura que el uso de IoT esté en sintonía con las metas globales de sostenibilidad.

Para garantizar un impacto sostenido del proyecto, se recomienda la creación de incentivos financieros, tales como líneas de crédito preferenciales o reducciones fiscales para aquellas empresas que incorporen dispositivos IoT en su gestión ambiental. Asimismo, es crucial fomentar la cooperación entre el sector académico y empresarial con el fin de desarrollar programas de capacitación especializados en el uso y aprovechamiento de estas tecnologías. La implementación de un sistema de monitoreo y evaluación periódica también se considera vital para medir el impacto real de la iniciativa, asegurando que los objetivos de sostenibilidad y rentabilidad social se mantengan en el tiempo.

En síntesis, aunque la implementación de dispositivos IoT en la gestión ambiental empresarial presenta desafíos económicos y técnicos, su viabilidad social y económica, demostrada por los indicadores de VANS e ICBS, es innegable. La superación de estos obstáculos requiere de políticas públicas efectivas, incentivos económicos y programas de sensibilización. La colaboración estratégica entre los actores públicos y privados será un factor determinante para asegurar la adopción y el uso eficiente de estas tecnologías, posicionando al Quindío como un referente en sostenibilidad e innovación tecnológica y contribuyendo a un crecimiento económico más equilibrado y consciente. Es crucial, además, que estos sistemas se integren en un marco de gobernanza más amplio que asegure su mantenimiento a largo plazo y su actualización conforme a los avances tecnológicos, consolidando una cultura empresarial orientada a la sostenibilidad como práctica estándar.

5. Conclusiones

La implementación de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) en la gestión ambiental empresarial en el Departamento del Quindío emerge como una oportunidad estratégica y decisiva para transitar hacia un desarrollo sostenible. Los resultados obtenidos en el análisis económico y social demuestran contundentemente que este tipo de iniciativas no solo son viables, sino que generan beneficios significativos tanto para las empresas como para la comunidad. Específicamente, el análisis de viabilidad socioeconómica mediante el Valor Actual Neto Social (VANS) y el Índice de Costo-Beneficio Social (ICBS) arrojó un VANS positivo de \$478,518,454.8 COP y un ICBS de 2.021. Esto indica que el valor presente de los beneficios sociales supera el de los costos sociales, y que, por cada peso invertido, se genera un retorno social neto de 2.021 pesos, confirmando la preferencia social y la viabilidad del proyecto bajo los parámetros establecidos.

La capacidad de medición de la huella de carbono y de la huella hídrica, facilitada por estos dispositivos, permite tomar medidas concretas en torno a la reducción de emisiones de CO₂ y el ahorro en el uso de recursos hídricos. Además, las mejoras en aspectos sociales como la calidad de vida de las comunidades y el fortalecimiento de la imagen corporativa de las empresas reflejan el potencial transformador de las tecnologías IoT en el cumplimiento de objetivos tanto ambientales como económicos.

A pesar de los retos inherentes a la adquisición e implementación de estos dispositivos, dados los costos iniciales y la necesidad de infraestructura tecnológica adecuada, el estudio confirma que estos obstáculos pueden ser superados a través de políticas públicas efectivas, incentivos económicos y programas de sensibilización. La colaboración estratégica entre actores públicos y privados será, por lo tanto, un factor clave para asegurar la adopción masiva y el uso eficiente de estas tecnologías en el tejido empresarial del Quindío.

En definitiva, el uso de dispositivos IoT no solo responde a las exigencias del marco normativo colombiano, como la Ley 1.931 de 2018 y la Resolución 1.447 de 2018, y a los compromisos internacionales adquiridos en materia de sostenibilidad, como el Acuerdo de París y la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). También posiciona al Quindío como un referente en sostenibilidad e innovación tecnológica, sentando las bases para un crecimiento económico más equilibrado y consciente, que contribuya al bienestar colectivo y a la preservación del medio ambiente.

Adicionalmente, la consolidación de estos avances tecnológicos requiere un enfoque integral que trascienda la mera instalación de hardware. Es crucial reconocer que el éxito a largo plazo dependerá en gran medida de la integración de estos sistemas dentro de un marco de gobernanza ambiental más amplio, que no solo fomente su adopción, sino que también asegure su mantenimiento continuo y su actualización conforme a los rápidos avances tecnológicos.

Por último, la implementación efectiva de estas tecnologías debe ir acompañada de la consolidación de una cultura empresarial proactiva orientada a la sostenibilidad. Será un factor determinante garantizar que la medición de huella de carbono e hídrica se convierta en una práctica estándar en la industria del Quindío, lo que no solo impulsará la eficiencia operativa y la reducción de impactos negativos, sino que también generará una ventaja competitiva para las empresas que lideren esta transición hacia modelos de producción más sostenibles (Wang *et al.*, 2022). Este cambio cultural y la estandarización de prácticas sostenibles son esenciales para maximizar el potencial de los dispositivos IoT y asegurar su contribución duradera al desarrollo regional.

7. Referencias Bibliográficas

- Alberti, M., Caini, L., Calabrese, A., & Rossi, D. (2000). Evaluation of the costs and benefits of an environmental management system. *International Journal of Production Research*, 38(17), 4455–4466. <https://doi.org/10.1080/00207540050205226>
- Bacco, M., Delmastro, F., Ferro, E., & Gotta, A. (2017). Environmental monitoring for Smart Cities. *IEEE Sensors Journal*, 17(23), 7767–7774. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2722819>
- Blanquicett, L., Murillo, L., & Fernandez, F. (2024). Carbon footprint measurement using a mobile app integrated with IoT technology. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1299(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1299/1/012001>
- Cámara de Comercio de Armenia y del Quindío. (2024). [Estudio económico]. camaraarmenia.org.co. <https://camaraarmenia.org.co/wp-content/uploads/2024/07/ESTUDIO-ECONOMICO.pdf>
- Chojer, H., Branco, P., Martins, F., Alvim-Ferraz, M., & Sousa, S. (2020). Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements. *The Science of the Total Environment*, 727, 138385. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138385>
- Congreso de la República. (2018, 27 de julio). *Ley 1931 de 2018. Por la cual se establecen directrices para la Gestión del Cambio Climático*. Función Pública. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87765>
- Contreras, J. D. L., & España, A. D. B. (2024). Sistema IoT para el monitoreo de variables ambientales en un ambiente laboral. *Revista Social Fronteriza*, 4(1), e41117. [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(1\)117](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(1)117)
- Contreras, L. M. G. (2020). Evolución de la política de cambio climático en Colombia. *Revista Ciudad Paz-ando*, 13(2), 241-255. <https://www.redalyc.org/journal/825/82563265025/html/>
- Departamento Nacional de Planeación. (2011, 14 de julio). *Documento CONPES 3700. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/conpes/econ%C3%B3micos/3700.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2022, 13 de junio). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. <https://ods.dnp.gov.co/>
- Edum-Fotwe, F. T., & Price, A. D. (2008). A social ontology for appraising sustainability of construction projects and developments. *International Journal of Project Management*, 27(4), 313–322. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.04.003>
- Fidje, E., Haddara, M., & Langseth, M. (2023). Sustainable smart waste management adoption challenges in developing countries. *Procedia Computer Science*, 219, 905–914. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.366>

Función Pública. (2017, 20 de diciembre). *Decreto 2157 de 2017. Por medio del cual se adopta directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y privadas en el marco del artículo 42 de la Ley 1523 de 2012.* <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=199583>

González, M. C. F. (2019). Análisis costo beneficio de las adquisiciones realizadas con criterios de sostenibilidad en entidades públicas priorizadas del orden nacional para promover el uso de bienes y servicios con este tipo de criterios en el país. *Revista De Tecnología*, 16(2), 148–163. <https://doi.org/10.18270/rt.v16i2.2529>

Harclerode, M. A., Lal, P., & Miller, M. E. (2013). Estimating social impacts of a remediation project life cycle with environmental footprint evaluation tools. *Remediation Journal*, 24(1), 5–20. <https://doi.org/10.1002/rem.21374>

Hsieh, M. Y. (2024). An Empirical Investigation into the Enhancement of Decision-making Capabilities in Corporate Sustainability Leadership through Internet of Things (IoT) Integration. *Internet of Things*, 101382. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101382>

Issa, J. S., Abdulrahman, L. M., Sam, T. M., Wasfi, B., & Abdulkareem, N. M. (2024). AI-powered Sustainability Management in Enterprise Systems based on Cloud and Web Technology: Integrating IoT Data for Environmental Impact Reduction. *Journal of Information Technology and Informatics*, 3(1), 156–176. https://www.researchgate.net/publication/382306224_AI-powered_Sustainability_Management_in_Enterprise_Systems_based_on_Cloud_and_Web_Technology_Integrating_IoT_Data_for_Environmental_Impact_Reduction

Jones, P., Hillier, D., & Comfort, D. (2016). The sustainable development goals and business. *International Journal of Sales, Retailing and Marketing*, 5(2), 38–48. <https://eprints.glos.ac.uk/3935/>

Karaeva, A., Tolkou, A., Cioca, L., & Lakatos, E. (2023). Family ISO 14000 standards as a tool of achieving environmental sustainability of enterprises. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1126(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1126/1/012036>

Lazarescu, M. T. (2013). Design of a WSN platform for long-term environmental monitoring for IoT applications. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 3(1), 45–54. <https://doi.org/10.1109/JETCAS.2013.2243032>

Leistritz, F. L., & Murdock, S. H. (1981). *The socioeconomic impact of resource development* (1.a ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429314605>

Lovett, G. M., Burns, D. A., Driscoll, C. T., Jenkins, J. C., Mitchell, M. J., Rustad, L., Shanley, J. B., Likens, G. E., & Haeuber, R. (2007). Who needs environmental monitoring? *The Ecological Society of America*, 5(1), 5. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[253:WNEM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[253:WNEM]2.0.CO;2)

Maldonado, E. G. (2021). Análisis de las causas de la migración en el contexto del cambio climático según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *Revista De El Colegio De San Luis*, 12(23), 1–32. <https://doi.org/10.21696/rcls122320221349>

Manuel, R. B., & Espinoza, G. (2002). *Gestión ambiental en América Latina y el Caribe: Evolución, tendencias y principales prácticas*. Repositorio Institucional Séneca. <https://doi.org/10.57784/1992/46544>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018, 1 de agosto). *Resolución 1447 de 2018. Por medio de la cual se establecen los lineamientos para el cálculo y reporte de la Huella de Carbono Corporativa*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1447-de-2018/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021, 10 de junio). *Ordenamiento Ambiental Territorial y Sistema Nacional Ambiental - SINA*. <https://www.minambiente.gov.co/ordenamiento-ambiental-territorial-y-sistema-nacional-ambiental-sina/lo-que-hacemos/#:~:text=Elaborar%20los%20planes%20y%20programas,el%20%C3%A1mbito%20de%20su%20competencia>

Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones Exteriores. (1997, 14 de abril). *Ley 16/1997, de 23 de abril, de regulación de los servicios de telecomunicaciones*. Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado (BOE). <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1997-8669>

Mois, G., Folea, S., & Sanislav, T. (2017). Analysis of Three IoT-Based Wireless Sensors for Environmental Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(8), 2056–2064. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2677619>

Naciones Unidas Colombia. (2025). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. <https://colombia.un.org/es/sdgs>

Netho, A. A., De Andrade, G. E., & Pereira, L. A. (2023, 24 de noviembre). Internet de las cosas (IoT) en la Gestión Ambiental de Ciudades Inteligentes: Presentación del Proyecto Smart Harpia como Estudio de Caso. *Alba*, 1(2), 182. <https://www.alba.ac.mz/index.php/alba/article/view/182>

ONU. (2022, 24 de mayo). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/#>

Páez, J. C. (2009). *Elementos de gestión ambiental*. Createspace.

Patel, S., Dey, A., Singh, S. K., Singh, R., & Singh, H. (2021). *Climate impacts on sustainable natural resource management*. Springer.

Pathak, P., & Dattani, P. (2014). Social return on investment: three technical challenges.

- Social Enterprise Journal*, 10(2), 91–104. <https://doi.org/10.1108/sej-06-2012-0019>
- Peña, Y. A., Pino, M. R. M., & De León, I. S. (2015). La Gestión Ambiental de la Cuenca del Río Magdalena desde un Enfoque Socialmente Responsable. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5440953>
- Phasinam, K., Usman, M., Bhattacharya, S., Kassanuk, T., & Tongkachok, K. (2022). Comparative analysis of environmental internet of things (\$\text{IoT}\$) and its techniques to improve profit margin in a small business. In *Communications in computer and information science* (pp. 160–168). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07012-9_14
- Slootweg, R., Vanclay, F., & Van Schooten, M. (2001). Function evaluation as a framework for the integration of social and environmental impact assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 19(1), 19–28. <https://doi.org/10.3152/147154601781767186>
- Tania, S. L., & Ronald, T. G. Y. (2020). *Uso del análisis costo-beneficio en la evaluación de proyectos de agua potable desde una perspectiva social* [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica del Perú. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UTPD_edbae320af2beeee018417043b3494fc
- Tur, A. A., & Crespo, P. A. (2021). Evaluación de impacto social: una propuesta metodológica orientada a la gestión proactiva de proyectos. *Dialnet*, 24(3), 145–168. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8041241>
- Urwin, K., & Jordan, A. (2007). Does public policy support or undermine climate change adaptation? Exploring policy interplay across different scales of governance. *Global Environmental Change*, 18(1), 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2007.08.002>
- Vedung, E. (1997). *Public policy and program evaluation* (1.a ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315127767>
- Wang, W., Zhang, D., Wang, H., Zhu, Q., & Heravi, H. M. (2022). How do businesses achieve sustainable success and gain a competitive advantage in the green era? *Kybernetes*, 52(9), 3241–3260. <https://doi.org/10.1108/k-07-2021-0614>
- Wilson, M., Li, X., Ma, Y., Smith, A., & Wu, J. (2017). A review of the economic, social, and environmental impacts of China's South–North Water Transfer Project: A Sustainability Perspective. *Sustainability*, 9(8), 1489. <https://doi.org/10.3390/su9081489>
- Zhao, Y., Tang, J., Huang, H., Wang, Z., Chen, T., Chiang, C., & Chiang, P. (2020). Development of \$\text{IoT}\$ technologies for air pollution prevention and improvement. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(12), 2874–2888. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0255>