

Marco de evaluación para la óptima selección de componentes de hardware para sistemas del Internet de las Cosas

Julio Víctor Sánchez-Hernández^{1,*}, Hugo Estrada-Esquivel¹,
Alicia Martínez-Rebollar¹, Fernando Pech-May²

¹ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
Departamento de Ciencias Computacionales,
México

² Tecnológico Nacional de México Campus de Los Ríos,
Academia de Ingeniería en Sistemas Computacionales,
México

m23ce084@cenidet.tecnm.mx, hugo.ee@cenidet.tecnm.mx, alicia.mr@cenidet.tecnm.mx,
fernando.pech@cinvestav.mx

Resumen. La selección de componentes de hardware es crucial en el diseño de soluciones de Internet de las Cosas, ya que influye en su rendimiento, costo y escalabilidad. La gran variedad de placas de desarrollo, sensores y periféricos disponibles complica el proceso de selección, ya que cada componente cuenta con características distintas. Este artículo propone un marco sistemático para la selección de hardware en sistemas Internet de las Cosas, en un enfoque basado en la identificación objetiva de criterios clave como eficiencia energética, costo, confiabilidad y facilidad de integración. El marco se aplicó en un caso de estudio para diseñar un nodo sensor para la agricultura de precisión, monitoreando temperatura y humedad del suelo. Los resultados demuestran que el marco agiliza la toma de decisiones, asegurando la elección de componentes alineados con los requisitos del proyecto y mejorando la calidad del diseño de sistemas del Internet de las Cosas.

Palabras clave. Internet de las Cosas, evaluación multicriterio, toma de decisiones, selección de hardware, sensores, placas de desarrollo.

Evaluation Framework for the Optimal Selection of Hardware Components for Internet of Things Systems

Abstract. The selection of hardware components is crucial in the design of Internet of Things solutions, as it directly impacts their performance, cost, and scalability.

The wide variety of available development boards, sensors, and peripherals complicates the selection process, given that each component has distinct characteristics. This paper proposes a systematic framework for hardware selection in Internet of Things systems, utilizing an approach based on the objective identification of key criteria such as energy efficiency, cost, reliability, and ease of integration. The framework was applied in a case study to design a sensor node for precision agriculture aimed at monitoring soil temperature and humidity. The results demonstrate that the framework streamlines decision-making, ensuring the selection of components aligned with project requirements while enhancing the quality of Internet of Things system designs.

Keywords. Internet of Things, multicriteria evaluation, decision making, hardware selection, sensors, development boards.

1. Introducción

El Internet de las Cosas ha surgido como un paradigma transformador en la investigación y la industria, permitiendo la interconexión de dispositivos inteligentes para la recopilación, transmisión y análisis de datos en tiempo real. Su impacto abarca sectores estratégicos como la salud, el transporte, la agricultura y los entornos domésticos, promoviendo mejoras en eficiencia operativa, sostenibilidad y calidad de vida [1]. La

integración de esta tecnología con la Inteligencia Artificial, el análisis de grandes volúmenes de datos y la Computación en la Nube continúa ampliando su potencial en la sociedad moderna [2].

Sin embargo, el desarrollo eficiente de estos sistemas interconectados depende en gran medida de la selección adecuada del hardware, particularmente de las placas de desarrollo y los sensores. La elección de estos componentes influye directamente en el rendimiento, la eficiencia energética, la escalabilidad y los costos operativos [3]. En muchos casos, dicha selección se basa en criterios subóptimos, como disponibilidad en el mercado, restricciones presupuestarias o preferencias personales, lo que puede generar sobrecostos, problemas de compatibilidad y limitaciones en el desempeño.

Para maximizar el impacto del Internet de las Cosas, es necesario adoptar un enfoque estructurado en la selección del hardware, considerando aspectos clave como el consumo energético, la capacidad de procesamiento, la compatibilidad con protocolos de comunicación, la resistencia a condiciones adversas, la posibilidad de expansión, entre otros aspectos. Optimizar esta etapa no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también permite el desarrollo de soluciones más sostenibles, adaptables y rentables a largo plazo [2].

En este contexto, el presente artículo introduce un marco de evaluación sistemático para la selección óptima de hardware en sistemas del Internet de las Cosas, con énfasis en placas de desarrollo y sensores. La metodología empleada se basa en técnicas de evaluación multicriterio, lo que permite comparar diversas opciones considerando eficiencia energética, capacidad de procesamiento, escalabilidad, compatibilidad con protocolos de comunicación y costos operativos. Este enfoque busca minimizar los compromisos tradicionales entre rendimiento y costo, asegurando soluciones más eficientes y adaptables a distintas aplicaciones y entornos.

El artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 presenta una revisión del estado del arte sobre la selección de hardware, plataforma o tecnologías en sistemas del Internet de las Cosas. La Sección 3 describe la metodología propuesta y los criterios de evaluación. En la Sección 4, se

aplica la metodología a un caso práctico para demostrar su utilidad en un escenario real. La Sección 5 analiza los resultados obtenidos y sus implicaciones en el diseño y despliegue de estos sistemas. Finalmente, la Sección 6 expone las conclusiones del estudio y plantea posibles líneas de investigación futura.

2. Trabajos relacionados

La creciente complejidad en el diseño de soluciones del Internet de las Cosas ha motivado el uso intensivo de metodologías de Análisis de Decisiones Multicriterio para seleccionar componentes de hardware, plataformas y tecnologías de manera fundamentada. Estas metodologías permiten evaluar alternativas considerando simultáneamente múltiples criterios técnicos, económicos, sociales o contextuales, proporcionando así mayor objetividad y trazabilidad en el proceso de decisión.

Diversos autores han desarrollado enfoques de Análisis de Decisiones Multicriterio desde diferentes perspectivas. Radulescu & Radulescu [4] quienes desarrollaron un modelo híbrido grupal basado en los métodos SAW, TOPSIS, VIKOR y COPRAS, integrando además la técnica Best Worst Method (BWM) para la ponderación de criterios. Esta aproximación se aplicó a problemas de selección en plataformas del Internet de las Cosas, permitiendo combinar múltiples perspectivas y ofrecer una solución agregada que reduce la variabilidad entre métodos individuales, validada mediante el análisis de correlación de Spearman para comprobar la consistencia entre rankings.

Por otra parte, Ilieva & Yankova [5] proponen un marco difuso utilizando la modificación del método MABAC dentro de un entorno de conjuntos difusos intuicionistas. Este enfoque es particularmente valioso para contexto con incertidumbre e información parcial, como ocurre en entorno agrícolas. Su metodología incluye tres componentes: grado de pertenencia, no pertenencia y grado de duda; lo que proporciona una base más precisa para comparar plataformas del Internet de las Cosas en condiciones imprecisas.

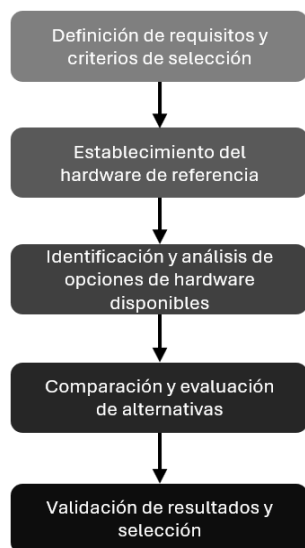


Fig. 1. Fases generales del marco de evaluación propuesto para la selección de componentes de hardware

En el ámbito de la seguridad, Radulescu *et al.* [6] aplican el método Fuzzy DEMATEL en combinación con técnicas de ponderación subjetiva para abordar la jerarquización de requisitos de seguridad en sistemas del Internet de las Cosas. Este enfoque multicriterio se orienta al análisis de causa – efecto, permitiendo modelar interdependencias entre criterios de seguridad y facilitando la priorización en decisiones de arquitecturas seguras para el Internet de las Cosas.

Desde una perspectiva más aplicada, Klusmann & Carnero [7] desarrollaron un análisis multicriterio clásico para la selección de tecnologías del Internet de las Cosas aplicadas a sistemas de telemetría urbana. La metodología combina criterios técnicos, sociales y económicos para evaluar tecnologías como LoRaWAN, Sigfox y NB-IoT, destacando la viabilidad del Análisis de Decisiones Multicriterio en contextos municipales y de infraestructura urbana.

Finalmente, Şahin & Tarhan [8] propusieron una estructura de selección basada en la norma ISO / IEC / 25010:2011, aplicando métodos como el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), TOPSIS y VIKOR. Esta metodología asegura una evaluación alineada con atributos de calidad

estandarizados, siendo adecuada para seleccionar modelos de Inteligencia Artificial y hardware embebido en Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV).

En contraste con estos estudios, el enfoque propuesto en este trabajo introduce un marco híbrido que combina la Matriz de Pugh con el Procesos de Jerarquía Analítica. Este marco metodológico destaca por su capacidad de integrar evaluaciones cualitativas y cuantitativas, minimizar la subjetividad y adaptarse a escenarios reales, como en el caso de selección de hardware para el Internet de las Cosas Subterráneas aplicado a la Agricultura de Precisión.

La Tabla 1 permite identificar las características clave de cada estudio, tales como el tipo de método utilizado, el entorno de aplicación y su contribución principal. Además, resalta el valor diferencial del enfoque híbrido propuesto en este trabajo, en comparación con modelos clásicos, difusos o normativos.

3. Marco de evaluación para la selección de componentes de hardware

Se propone un marco de evaluación híbrido para la selección de hardware en sistemas del Internet de las Cosas, que combina la Matriz de Pugh y el Proceso de Jerarquía Analítica. Esta integración permite unir análisis cualitativo y cuantitativo, reduciendo la subjetividad y respaldando decisiones con datos.

La Matriz de Pugh, propuesta por Stuart Pugh en 1991 [9], permite comparar alternativas respecto a una opción de referencia mediante valores relativos. No obstante, carece de ponderación explícita de criterios y de un análisis cuantitativo detallado. Para superar esta limitación, se incorpora el Proceso de Jerarquía Analítica de Saaty [10], utilizando la adaptación de Salam y Raza, aplicada a la selección de sensores en el Internet de las Cosas Subterráneas [11]. Este método asigna pesos a los criterios mediante comparaciones por pares, brindando una evaluación más objetiva y contextualizada. El marco de evaluación propuesto se organiza en cinco fases para guiar eficientemente la selección de los componentes de hardware para los

Tabla 1. Comparativa de metodologías de Análisis de Decisiones Multicriterio aplicadas en la selección componentes en sistemas del Internet de las Cosas

AUTORES		MÉTODO MCDA	DESCRIPCIÓN DEL ENFOQUE Y APLICACIÓN
Marco de evaluación	de	Proceso de Jerarquía Analítica y Matriz de Pugh	Integra criterios cualitativos y cuantitativos para seleccionar placas y sensores en entornos agrícolas subterráneos. Reduce subjetividad y es fácilmente replicable en casos reales.
Radulescu & Radulescu [4]		SAW, TOPSIS, VIKOR, COPRAS y BWM	Enfoque grupal que combina múltiples métodos para evaluar plataformas del Internet de las Cosas. Valida los resultados con análisis estadístico (Spearman).
Ilieva & Yankova [5]		MABAC Difuso	Evalúa plataformas del Internet de las Cosas considerando incertidumbre en criterios. Usa lógica difusa avanzada para modelar decisiones con ambigüedad.
Radulescu et al. [6]		Fuzzy DEMATEL	Jerarquiza criterios en seguridad en el Internet de las Cosas mostrando relaciones causa-efecto. Útil en sistemas críticos con dependencias complejas.
Klusmann & Carnero [7]		Análisis multicriterio clásico	Utilizado en decisiones municipales para evaluar tecnologías de comunicación del Internet de las Cosas. Combina criterios técnicos, sociales y económicos.
Şahin & Tarhan [8]		AHP, TOPSIS y VIKOR (ISO/IEC 25010)	Selección de hardware y modelos de Inteligencia Artificial en Vehículos Aéreos No Tripulados con base en estándares de calidad del software. Orientado a entornos embebidos.

sistemas del Internet de las Cosas. La Fig. 1 muestra las fases generales del marco de evaluación propuesto.

Fase 1. Definición de requisitos y criterios de selección

En esta etapa se identifican las necesidades del proyecto de Internet de las Cosas y se determinan los criterios clave para evaluar el hardware, los cuales pueden incluir aspectos como eficiencia energética, capacidad de procesamiento, conectividad, análisis de costos, ecosistema de desarrollo, facilidad de integración, fiabilidad y disponibilidad de componentes [12][13]. Estos criterios se ponderan de acuerdo con su relevancia dentro del contexto del proyecto mediante el Proceso de Jerarquía Analítica. Para ello, se utiliza una matriz de comparación por pares basada en la escala de Saaty, que luego se normaliza para obtener un vector de pesos. Finalmente, se verifica la coherencia de la ponderación calculando el índice y la razón de consistencia.

Fase 2. Establecimiento del hardware de referencia

Siguiendo con el proceso, y conforme a la metodología de la Matriz de Pugh, se elige una alternativa base que cumpla con los requisitos

mínimos del proyecto y, de ser posible, que cuente con reconocimiento en la industria. Esta opción actúa como referencia para comparar de forma estandarizada las demás alternativas consideradas.

Fase 3. Identificación y análisis de opciones de hardware disponibles

En esta fase se identifican y analizan las alternativas de hardware disponibles en el mercado. Se recopila información clave sobre cada una, incluyendo especificaciones técnicas como frecuencia de reloj, memoria e interfaces disponibles, así como su rendimiento en términos de procesamiento y consumo energético. Para asegurar la precisión y confiabilidad de los datos, se consultan múltiples fuentes, como documentación oficial, pruebas de rendimiento y estudios previos en contextos similares [14]. Este análisis es fundamental para reducir la incertidumbre y asegurar que las opciones evaluadas sean viables dentro del proyecto.

Fase 4. Comparación y evaluación de alternativas

La evaluación de alternativas de hardware se realiza en dos etapas complementarias. Primero, se aplica la Matriz de Pugh para comparar cada opción frente a una alternativa base, asignando

Tabla 2. Matriz de comparación por pares para la ponderación de criterios en la selección de la placa de desarrollo

CRITERIOS	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	3	4	5	6
C2	1/3	1	3	4	5
C3	1/4	1/3	1	3	4
C4	1/5	1/4	1/3	1	2
C5	1/6	1/5	1/4	1/2	1

valores cualitativos de superioridad, equivalencia o inferioridad según los criterios establecidos. Esto permite visualizar de forma estructurada las fortalezas y debilidades de cada alternativa.

Luego, estos resultados se convierten en valores numéricos y se ponderan según los pesos definidos mediante el Proceso de Jerarquía Analítica. La suma ponderada de estos valores proporciona una puntuación final que refleja el desempeño cuantitativo de cada opción.

Fase 5. Validación de resultados y selección

Con las puntuaciones finales obtenidas, se procede a comparar las alternativas para identificar la opción con el mejor desempeño global. Para asegurar la solidez de la decisión, se recomienda realizar un análisis de sensibilidad, evaluando el impacto de posibles variaciones en los pesos asignados a los criterios. Esto permite comprobar la robustez de la selección y evitar que la decisión final esté condicionada por un solo factor. Finalmente, se elige la alternativa óptima, fundamentando la elección en el análisis cuantitativo, la relevancia de los criterios evaluados y las particularidades del proyecto.

4. Construcción de un nodo sensor para el Internet de las Cosas Subterráneas utilizando el marco de evaluación

En esta sección, se aplica el marco de evaluación propuesto al diseño de un nodo sensor para medir la temperatura y humedad del suelo en el contexto del Internet de las Cosas Subterráneas. Este concepto se basa en la interconexión de dispositivos ubicados bajo tierra, con aplicaciones en el monitoreo de condiciones

edáficas, agricultura de precisión y gestión ambiental, contribuyendo a la optimización de recursos como el riego y a la sostenibilidad del ecosistema [15].

El objetivo principal del proyecto es desarrollar un nodo sensor para medir la temperatura y humedad del suelo en zonas agrícolas subterráneas. Para ello, se priorizan criterios clave como conectividad de largo alcance, bajo consumo energético, capacidad de procesamiento, fiabilidad del hardware y costo.

Fase 1. Definición de requisitos y criterios de selección

Para la selección de la placa de desarrollo, se identificaron cinco criterios fundamentales. El consumo energético (C1) es especialmente relevante en entornos subterráneos, donde el acceso a fuentes de energía es limitado y el sistema debe operar de forma eficiente durante largos periodos. La capacidad de procesamiento y memoria (C2) define la habilidad del dispositivo para ejecutar algoritmos de análisis y gestionar datos en tiempo real. La conectividad (C3) considera la compatibilidad con protocolos como LoRa, Wi-Fi o Bluetooth, indispensables para garantizar una transmisión de datos confiable en condiciones adversas. El ecosistema de desarrollo y soporte (C4) hace referencia a la disponibilidad de herramientas, documentación y apoyo comunitario, lo cual facilita la implementación y mantenimiento del hardware. Finalmente, el costo (C5) incluye tanto la inversión inicial como los gastos operativos asociados al uso prolongado del dispositivo.

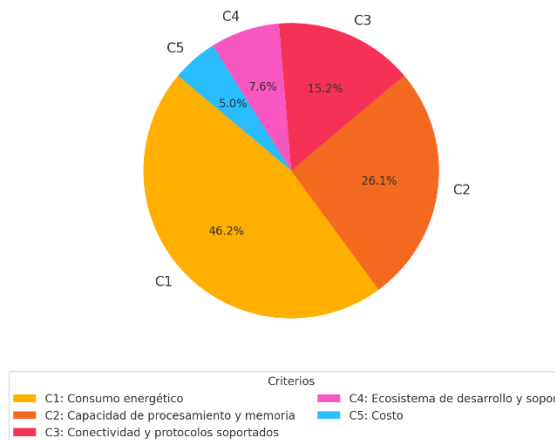
La Tabla 2 muestra la matriz utilizada para evaluar esta ponderación en el proceso de selección.

Para calcular los pesos relativos de cada criterio, es necesario normalizar la matriz de comparación por pares. Este proceso permite transformar los valores originales en proporciones comparables, facilitando la obtención del peso relativo de cada criterio dentro del conjunto evaluado. La normalización se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$a_{ij}^i = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}}, \quad (1)$$

Tabla 3. Matriz de comparación por pares tras el proceso de normalización, utilizada para calcular los pesos relativos de los criterios evaluados

CRITERIOS	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.51	0.62	0.46	0.37	0.33
C2	0.17	0.20	0.34	0.29	0.27
C3	0.12	0.06	0.11	0.22	0.22
C4	0.10	0.05	0.03	0.07	0.11
C5	0.09	0.04	0.02	0.03	0.05

**Fig. 2.** Distribución de pesos por criterio en la selección de placa de desarrollo

donde a_{ij} representa el valor de la comparación entre el criterio i y el criterio j , y a_{ij}^i es el valor normalizado. Una vez normalizada la matriz, el peso relativo de cada criterio se obtiene promediando los valores de cada fila.

En la Tabla 3 se presenta la matriz obtenida después de la normalización de los criterios para la selección de la placa de desarrollo.

A continuación, se calculan los pesos finales de cada criterio en la selección de la placa de desarrollo. Estos pesos reflejan la importancia relativa de cada criterio dentro del proceso de decisión. Para obtenerlos, se promedian los valores de cada fila en la matriz normalizada, lo cual permite resumir la influencia de cada criterio en una única cifra. El cálculo se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij}^i, \quad (2)$$

Tabla 4. Resultado del cálculo de la consistencia de los pesos para la placa de desarrollo

CRITERIOS	RESULTADO
C1	2.34
C2	1.23
C3	0.76
C4	0.42
C5	0.55

donde w_i representa el peso del criterio i , a_{ij}^i es el valor normalizado de la comparación entre los criterios i y j , y n es el total de criterios evaluados.

Para facilitar la interpretación de los resultados, la Fig. 2 representa gráficamente la distribución de los pesos asignados a cada criterio mediante un gráfico de pastel. Esta visualización permite observar de forma clara la influencia relativa de cada factor en el proceso de selección de la placa de desarrollo.

La verificación de consistencia en el Proceso de Jerarquía Analítica es esencial para asegurar la coherencia lógica en las comparaciones entre criterios y respaldar la validez del análisis. A partir de la matriz de comparación por pares normalizada (ver Tabla 3), se calcula el vector de pesos normalizando sus valores y promediando cada fila. Este vector representa la importancia relativa de cada criterio en la selección de la placa de desarrollo. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$pesos = [0.4619, 0.2607, 0.1518, 0.0758, 0.0498]$$

Los resultados confirman que el criterio más relevante es C1 (Consumo de energía), seguido por C2 (Capacidad de procesamiento) y C3 (Conectividad). Para verificar la consistencia del modelo, se multiplica la matriz de comparación por el vector de pesos calculado, lo que permite evaluar la coherencia interna del juicio comparativo. Los valores resultantes de este procedimiento se presentan en la Tabla 4.

Para evaluar la consistencia de la matriz de comparación por pares, se calcula un vector de consistencia dividiendo cada valor resultante de la multiplicación de la matriz original por el vector de pesos entre el peso correspondiente. Este vector permite identificar posibles desviaciones en las comparaciones realizadas. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

5.07, 4.72, 5.01, 5.55, 5.63.

A partir de estos valores, se calcula λ_{max} , que representa un indicador clave para evaluar la consistencia de la matriz de comparación por pares. El resultado obtenido es el siguiente:

$$\lambda = \frac{5.07 + 4.72 + 5.01 + 5.55 + 5.63}{5} = 5.25.$$

El valor de $\lambda_{max} = 5.25$ indica una ligera desviación respecto al valor ideal ($n = 5$), lo cual es esperable en evaluaciones subjetivas. Este resultado sugiere que la matriz de comparación presenta una consistencia aceptable, siempre y cuando la razón de consistencia (CR) se mantenga dentro del umbral establecido (generalmente < 0.10). Por tanto, los juicios realizados pueden considerarse coherentes y válidos para el proceso de toma de decisiones.

El Índice de Consistencia (CI) cuantifica el grado de desviación respecto a una matriz perfectamente consistente. Se utiliza para evaluar la validez de los juicios comparativos realizados y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (3)$$

donde λ_{max} es el valor promedio obtenido y n es el número de criterios evaluados.

El resultado del Índice de Consistencia fue $CI = 0.0625$, lo cual indica una desviación baja respecto a la consistencia ideal. Este valor sugiere que las comparaciones realizadas entre los criterios son razonablemente coherentes y que los pesos obtenidos pueden considerarse confiables para la toma de decisiones.

Para evaluar si la consistencia de la matriz es aceptable, se calcula la Razón de Consistencia (CR), la cual compara el Índice de Consistencia (CI) con el Índice Aleatorio (RI). Para matrices de tamaño $n = 5$, Saaty establece un valor de $RI = 1.12$. La relación se determina mediante la siguiente fórmula:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (4)$$

El valor obtenido de $CR = 0.0558$ se encuentra por debajo del umbral recomendado de 0.1, lo que confirma que la matriz de comparación presenta una consistencia aceptable. Por tanto, las

comparaciones realizadas son coherentes y el proceso de ponderación puede considerarse válido, sin necesidad de realizar ajustes adicionales.

Para la selección del sensor de temperatura y humedad del suelo, se identificaron cinco criterios clave que orientan el proceso de decisión. El primero es la fiabilidad y robustez (C1), que se refiere a la capacidad del sensor para funcionar adecuadamente en entornos adversos. Le sigue la precisión y exactitud (C2), fundamental para garantizar mediciones confiables y reproducibles. El consumo de energía (C3) es también un factor crítico, especialmente en sistemas de operación prolongada con recursos energéticos limitados. El costo (C4) contempla tanto el precio de adquisición como los gastos operativos y de mantenimiento. Por último, la facilidad de integración (C5) considera la compatibilidad del sensor con la plataforma de desarrollo y los protocolos de comunicación utilizados.

La matriz de comparación por pares correspondiente se presenta en la Tabla 5.

La matriz de comparación por pares se normaliza para calcular los pesos relativos de cada criterio, aplicando la Fórmula 1 previamente descrita. Este proceso permite estandarizar las valoraciones y determinar la importancia relativa de cada factor en la selección del sensor. La Tabla 6 muestra la matriz normalizada resultante.

Tras normalizar la matriz de comparación, se calcularon los pesos finales que reflejan la importancia relativa de cada criterio en la selección del sensor. La fiabilidad y robustez (C1) destaca como el criterio más influyente, seguido por la precisión y exactitud (C2). La Fig. 3 muestra un gráfico de pastel que facilita la visualización de esta distribución, permitiendo identificar con claridad los factores que mayor impacto tienen en la toma de decisiones.

A partir de la matriz normalizada (Tabla 6), se calculó el vector de pesos promediando los valores de cada fila, obteniéndose los siguientes resultados:

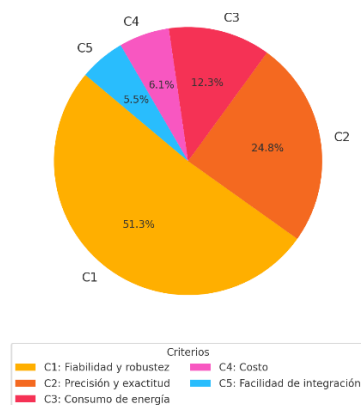
$$pesos = [0.466, 0.218, 0.108, 0.050, 0.062].$$

Tabla 5. Matriz de comparación por pares para la ponderación de criterios en la selección del sensor de temperatura y humedad del suelo

CRITERIOS	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	5	6	7	7
C2	1/5	1	4	5	6
C3	1/6	1/4	1	3	4
C4	1/7	1/5	1/3	1	2
C5	1/7	1/6	1/4	1/2	1

Tabla 6. Matriz de comparación por pares tras el proceso de normalización, utilizada para calcular los pesos relativos de los criterios evaluados

CRITERIOS	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.50	0.63	0.49	0.38	0.33
C2	0.10	0.12	0.32	0.27	0.28
C3	0.08	0.03	0.08	0.16	0.19
C4	0.07	0.02	0.02	0.05	0.09
C5	0.07	0.02	0.02	0.11	0.09

**Fig. 3.** Distribución de pesos por criterio en la selección del sensor de temperatura y humedad del suelo**Tabla 7.** Resultado del cálculo de la consistencia de los pesos para el sensor de temperatura y humedad del suelo

CRITERIOS	RESULTADO
C1	2.55
C2	1.19
C3	0.72
C4	0.41
C5	0.55

Para verificar la coherencia del modelo, se multiplicó la matriz de comparación por pares por el vector de pesos. El vector resultante, mostrado

en la Tabla 7, permite evaluar la consistencia de las comparaciones realizadas entre los criterios.

Finalmente, se calculó el valor de $\lambda_{max} = 5.4339$, a partir del cual se determinó el Índice de Consistencia (CI) utilizando la Fórmula 3, y posteriormente, la Razón de Consistencia (CR) mediante la Fórmula 4. Estos indicadores permiten verificar si las comparaciones realizadas entre criterios son coherentes. Como se muestra en la Tabla 7, los resultados obtenidos ($CI = 0.1085$ y $CR = 0.0969$) se encuentran dentro del umbral aceptable ($CR < 0.10$), lo que valida la consistencia del modelo.

Fase 2. Establecimiento del hardware de referencia

La selección de la placa de desarrollo y del sensor de temperatura y humedad del suelo se fundamentó en un análisis de la literatura científica y estudios previos sobre el Internet de las Cosas Subterráneas. Para la placa, se priorizaron dispositivos de bajo consumo energético y conectividad de largo alcance, identificándose la Adafruit Feather M0 LoRa como una opción adecuada, conforme a Levintal *et al.* [16] y Payero *et al.* [17]. En cuanto al sensor, el Decagon 5TE fue reconocido como un estándar confiable por su precisión y estabilidad en condiciones de campo.

Ambos dispositivos se utilizarán como referencia inicial en la aplicación del marco de selección de hardware (ver Fig. 4), facilitando una evaluación comparativa con otras opciones y asegurando el cumplimiento de los requisitos del proyecto.

Fase 3. Identificación y análisis de opciones de hardware disponibles

Con el fin de asegurar la eficiencia del nodo sensor, se seleccionaron varias placas de desarrollo que cumplen con los requerimientos del proyecto en conectividad, bajo consumo energético, capacidad de procesamiento y compatibilidad con sensores ambientales. Las opciones consideradas para su evaluación son: Adafruit Feather M0 LoRa (A0), Arduino MKR WAN 1310 (A1), Heltec WiFi LoRa 32 V2 (A2) y TTGO LoRa32 (A3) (ver Fig. 5). Estas placas destacan por su uso generalizado en proyectos de Internet de las Cosas y su idoneidad para aplicaciones de monitoreo ambiental en entornos



Fig. 4. Placa de desarrollo y sensor de temperatura tomado como referencia base para su comparación con alternativas]

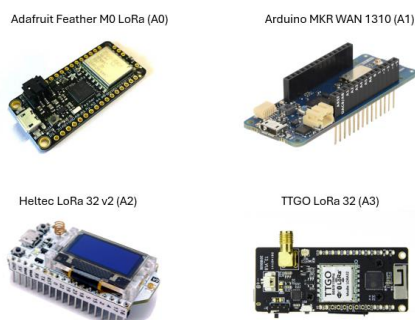


Fig. 5. Placa de desarrollo base y sus alternativas que cumplen con los criterios de selección



Fig. 6. Sensor de temperatura y humedad del suelo base y sus alternativas que cumplen con los criterios de selección

agrícolas. Cada una será evaluada conforme a los criterios establecidos en el marco de selección, permitiendo una comparación estructurada para

identificar la alternativa más adecuada para el nodo sensor.

Para asegurar la precisión y confiabilidad en la medición de las condiciones del suelo, se seleccionaron sensores reconocidos por su uso en aplicaciones agrícolas y ambientales. Las opciones consideradas para su evaluación son: Decagon 5TE (A0), FS200-SHT10 (A1), SHT20 Soil Sensor (A2) y SEN0193 (A3) (ver Fig. 6). La elección se basó en criterios como la precisión en la medición de temperatura y humedad, la robustez para operar en entornos subterráneos y la compatibilidad con las placas de desarrollo previamente evaluadas.

Fase 4. Comparación y evaluación de alternativas

La evaluación de las placas de desarrollo se realizó mediante un análisis comparativo utilizando la Matriz de Pugh, en la cual cada alternativa fue contrastada cualitativamente con la opción base, la Adafruit Feather M0 LoRa (A0). Este procedimiento consideró los criterios previamente definidos y ponderados en la metodología. Las calificaciones asignadas expresan el desempeño relativo de cada opción: un valor de +1 indica que la alternativa supera a la base, 0 que presenta un rendimiento equivalente, y -1 que es inferior.

Para cuantificar el impacto global, estas calificaciones se multiplicaron por los pesos correspondientes a cada criterio y se sumaron, obteniendo así una puntuación final por alternativa. Los resultados de este análisis se presentan en las Tabla 8 y en la Fig. 7, permitiendo identificar la opción más adecuada de manera estructurada.

La evaluación de los sensores de temperatura y humedad del suelo se llevó a cabo mediante la Matriz de Pugh, en la que cada alternativa fue comparada cualitativamente con la opción base, el Decagon 5TE (A0). Esta comparación se realizó considerando los criterios definidos y ponderados en el marco de evaluación.

La Tabla 9 muestra las calificaciones cualitativas asignadas a cada sensor en función de su desempeño relativo frente a la opción base, mientras que la Fig. 8 presenta los resultados ponderados, obtenidos al multiplicar dichas

Tabla 8. Calificaciones cualitativas asignadas a cada alternativa de la placa de desarrollo en relación con la opción base (A0), utilizando la Matriz de Pugh.

CRITERIOS	PESOS	A0	A1	A2	A3
C1	46.19%	0	+1	-1	-1
C2	26.07%	0	+1	+1	0
C3	15.18%	0	0	+1	+1
C4	7.58%	0	0	-1	-1
C5	4.98%	0	-1	-1	-1

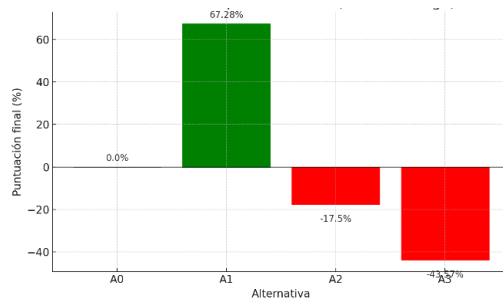


Fig. 7. Desempeño relativo y puntuación final de cada alternativa de la placa de desarrollo, obtenida mediante la Matriz de Pugh

Tabla 9. Calificaciones cualitativas asignadas a cada alternativa del sensor de temperatura y humedad del suelo en relación con la opción base (A0), utilizando la Matriz de Pugh

CRITERIOS	PESOS	A0	A1	A2	A3
C1	46.13%	0	0	0	-1
C2	22.36%	0	+1	+1	-1
C3	11.08%	0	+1	+1	+1
C4	5.48%	0	0	+1	-1
C5	4.95%	0	+1	-1	+1

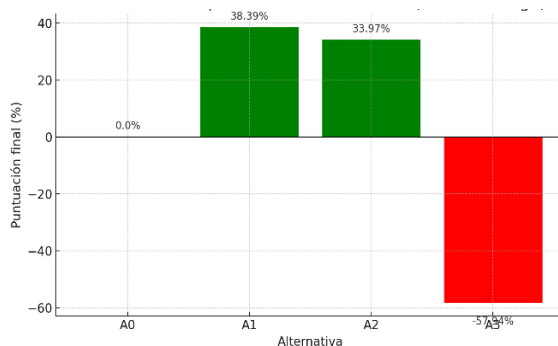


Fig. 8. Desempeño relativo y puntuación final de cada alternativa del sensor de temperatura y humedad del suelo, obtenida mediante la Matriz de Pugh

calificaciones por los pesos correspondientes y sumar los valores para cada alternativa.

Fase 5. Validación de resultados y selección

A partir de las puntuaciones finales obtenidas mediante la Matriz de Pugh, se procedió a identificar las alternativas con mejor desempeño para el nodo sensor. En el caso de las placas de desarrollo, la alternativa A1 (Arduino MKR WAN 1310) obtuvo la puntuación más alta con +67.28 %, mientras que, para los sensores de temperatura y humedad del suelo, la alternativa A1 (FS200-SHT10) alcanzó el mayor valor con +38.39 %, ambos con respecto a la opción base.

Para validar la solidez de estas decisiones y garantizar que no dependan de un único criterio con alto peso, se realizó un análisis de sensibilidad, cuyas puntuaciones modificadas se muestran en la Tabla 10 y 11. Este análisis consideró dos escenarios: el primero, con una reducción del peso del criterio más influyente (C1) al 30 %, y el segundo, con un aumento del peso del criterio C2 al 40 %, contemplando su posible mayor relevancia operativa.

Los resultados indican que, para las placas de desarrollo, la alternativa A1 mantiene el mejor desempeño en ambos escenarios, con puntuaciones de 57.44 y 73.45, lo cual confirma la robustez de su selección. En cuanto a los sensores, aunque A1 sigue mostrando buen rendimiento, la alternativa A2 (SHT20 Soil Sensor) supera ligeramente en ambos escenarios, con valores de 67.30 y 79.60, lo que sugiere que podría volverse preferente si se reevalúan las prioridades de ciertos criterios técnicos.

Estas variaciones pueden apreciarse claramente en las Figuras 9 y 10, que muestran la comparación gráfica del desempeño de cada alternativa bajo ambos escenarios para placas de desarrollo y sensores, respectivamente. Las gráficas refuerzan visualmente la estabilidad de las decisiones tomadas y permiten observar cómo se comportan las alternativas frente a cambios razonables en los pesos de evaluación.

Como parte del proceso de validación del marco de evaluación propuesto, se aplicó el método TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) [18] con el fin de comparar los resultados obtenidos y comprobar la robustez de las decisiones

Tabla 10. Puntuaciones ponderadas considerando los escenarios de variación en los pesos de los criterios previamente definidos para las placas de desarrollo

Alternativa	Escenario 1	Escenario 2
A0	0	0
A1	57.435	73.445
A2	7.322	4.639
A3	-26.591	-35.360

Tabla 11. Puntuaciones ponderadas considerando los escenarios de variación en los pesos de los criterios previamente definidos para los sensores de temperatura y humedad del suelo

Alternativa	Escenario 1	Escenario 2
A0	0	0
A1	37.296	42.110
A2	67.296	79.596
A3	-90.139	-93.848

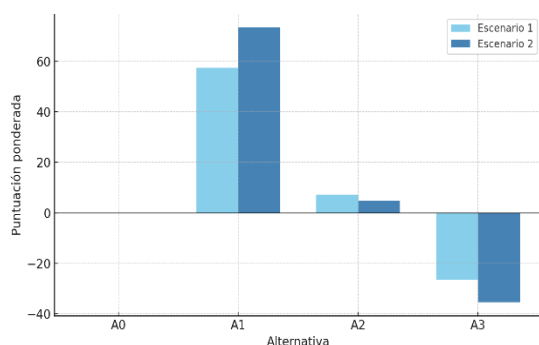


Fig. 9. Análisis de sensibilidad de las alternativas de placas de desarrollo

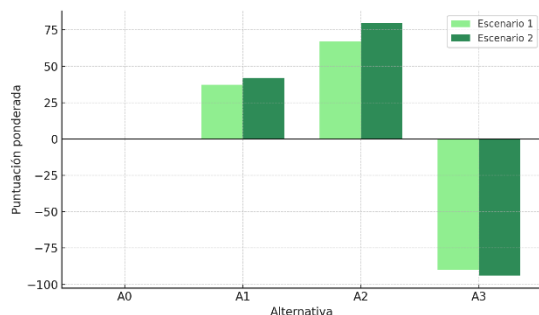


Fig. 10. Análisis de sensibilidad de las alternativas de sensores de temperatura y humedad del suelo

derivadas. Este enfoque adicional permite verificar si la selección de hardware se mantiene

consistente bajo una técnica multicriterio diferente, reforzando así la solidez del caso de estudio.

Se evaluaron las mismas alternativas previamente analizadas mediante matrices de decisión cuantitativas con valores normalizados de 1 a 10, que reflejan su desempeño en cinco criterios (ver Tablas 12 y 13).

En TOPSIS, los criterios se clasificaron como de beneficio o costo, considerando el sentido de optimización. Por ejemplo, el consumo energético y el costo se trataron como criterios de tipo costo, mientras que la precisión, procesamiento e integración se evaluaron como criterios de beneficio.

Los resultados para las placas de desarrollo, mostrados en la Tabla 14 y la Figura 11, confirman la consistencia del marco propuesto. La alternativa A1 (Arduino MKR WAN 1310) obtuvo el mayor puntaje (0.74), seguida de A0 (Feather M0 LoRa) con 0.61, mientras que A2 y A3 registraron valores considerablemente inferiores (0.28). Estos resultados respaldan la elección de A1 como la opción más equilibrada en términos de eficiencia, capacidad de procesamiento, conectividad y soporte de desarrollo.

Para los sensores de suelo, los resultados se muestran en la Tabla 15 y en la Figura 12. En este caso, la alternativa A0 (Decagon 5TE) obtuvo el mayor puntaje (0.70), seguida por A1 (FS200-SHT10) con 0.44. Esto representa una diferencia respecto al marco propuesto, donde A1 había sido seleccionada como la mejor opción. No obstante, la diferencia puede explicarse por el tipo de ponderación igualitaria utilizada en TOPSIS, mientras que el marco propuesto emplea una ponderación jerárquica basada en criterios priorizados específicamente para el proyecto.

5. Resultados e implicaciones

El marco de evaluación propuesto permitió optimizar la selección de la placa de desarrollo y el sensor de temperatura y humedad para el nodo sensor subterráneo. A diferencia de metodologías previas, que se centran en modelos de decisión multicriterio individuales como PROMETHEE o TOPSIS, nuestro enfoque combina la Matriz de Pugh y el Proceso de Jerarquía Analítica para integrar tanto criterios cuantitativos como

Tabla 12. Matriz de decisión para placas de desarrollo

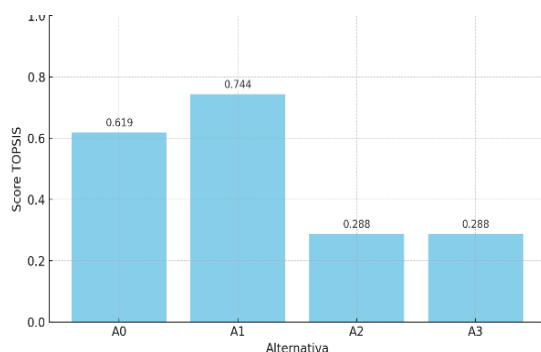
Alternativa	C1	C2	C3	C4	C5
A0	9	7	8	8	6
A1	10	8	8	9	7
A2	7	9	9	6	9
A3	7	9	9	6	9

Tabla 13. Matriz de decisión para sensores de temperatura y humedad del suelo

Alternativa	C1	C2	C3	C4	C5
A0	10	10	6	3	7
A1	8	8	9	8	9
A2	7	8	9	9	8
A3	6	7	9	10	7

Tabla 14. Matriz de decisión para las placas de desarrollo utilizando TOPSIS

Alternativa	Score	Ranking
A0	0.619	2
A1	0.743	1
A2	0.287	4
A3	0.287	3

**Fig. 11.** Resultados del método TOPSIS para placas de desarrollo

cualitativos de manera estructurada. Esta combinación permite reducir la subjetividad en la toma de decisiones, asegurando que las alternativas sean evaluadas con base en datos objetivos y ponderaciones ajustables.

En comparación con las metodologías existentes, este marco ofrece varias mejoras clave. Su flexibilidad y adaptabilidad lo hacen aplicable en escenarios donde las condiciones ambientales restringen la disponibilidad de datos completos, como el Internet de las Cosas Subterráneas, mientras que métodos previos han

sido aplicados principalmente en entornos industriales o agrícolas. Además, reduce la dependencia de comparaciones subjetivas, ya que metodologías como PROMETHEE requieren comparaciones de pares o estructuras jerárquicas que pueden introducir sesgos, mientras que la matriz de Pugh permite una evaluación más estructurada y eficiente. Su diseño modular y escalable facilita su aplicación en diversos contextos del Internet de las Cosas, como monitoreo ambiental, ciudades inteligentes y agricultura de precisión, superando enfoques previos que han sido diseñados para casos de uso más específicos. Asimismo, al proporcionar una estructura clara para la ponderación y evaluación de criterios, el marco propuesto mejora la reproducibilidad y transparencia de los resultados, reduciendo la variabilidad inherente a metodologías basadas únicamente en juicio de expertos.

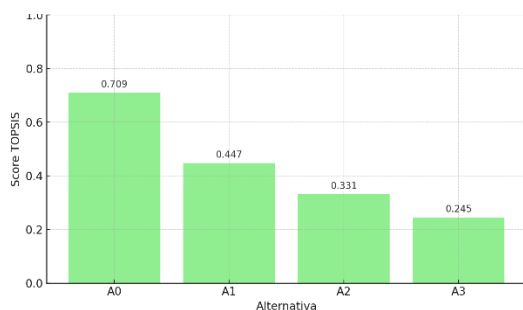
Si bien la precisión de los resultados depende de la calidad de los datos y la asignación de pesos a los criterios de evaluación, el análisis de sensibilidad permite mitigar estas limitaciones. Además, la integración futura con técnicas de aprendizaje automático podría automatizar la selección de hardware, permitiendo el ajuste dinámico de los pesos según patrones en datos históricos. Estas mejoras posicionan este marco como una solución más robusta y escalable en comparación con las metodologías previas, ofreciendo un enfoque innovador y adaptable para la selección de hardware en aplicaciones de Internet de las Cosas.

6. Conclusiones

El marco de evaluación sistemático desarrollado para la selección de componentes de hardware en proyectos del Internet de las Cosas, implementado en un caso de estudio para la selección de placas de desarrollo y sensores, ha demostrado ser efectivo y práctico en la toma de decisiones tecnológicas. En el caso de estudio, permitió identificar de manera objetiva que la Arduino MKR WAN 1310 y el FS200-SHT10 son las opciones más adecuadas para el nodo sensor subterráneo, cumpliendo con los criterios previamente definidos en términos de consumo

Tabla 15. Matriz de decisión para los sensores de temperatura y humedad del suelo utilizando TOPSIS

Alternativa	Score	Ranking
A0	0.709	1
A1	0.446	2
A2	0.330	3
A3	0.245	4

**Fig. 12.** Resultados del método TOPSIS para los sensores de temperatura y humedad del suelo

energético, fiabilidad, integración y costo. Este enfoque metodológico no solo facilita la identificación de componentes óptimos, sino que también mejora la calidad y eficiencia en el diseño de sistemas del Internet de las Cosas al proporcionar un proceso estructurado y replicable. Su combinación de evaluaciones cualitativas y cuantitativas reduce la subjetividad en la toma de decisiones, lo que lo hace aplicable a una variedad de entornos tecnológicos.

Para fortalecer la aplicabilidad y precisión de esta metodología, se plantean diversas líneas de desarrollo futuro. La incorporación de análisis multicriterio avanzados, como métodos de optimización basados en inteligencia artificial, permitirá mejorar la precisión en la ponderación de criterios. Asimismo, el desarrollo de herramientas automatizadas facilitará la actualización en tiempo real de especificaciones técnicas y la evaluación dinámica de alternativas. La validación empírica del marco en distintos escenarios del Internet de las Cosas asegurará su adaptabilidad a sectores como la agricultura de precisión, monitoreo ambiental, salud y manufactura inteligente.

Además, con el objetivo de demostrar la flexibilidad y escalabilidad del marco, se considera pertinente su aplicación futura en casos concretos como ciudades inteligentes, donde se requiera

seleccionar hardware para redes de sensores urbanos; en sistemas de monitoreo ambiental con condiciones variables y sensores distribuidos; o en procesos industriales conectados dentro del ámbito de la manufactura 4.0. Estos contextos representan entornos con requerimientos específicos, lo que permitiría evidenciar cómo el marco se adapta a diferentes dominios del IoT, manteniendo la rigurosidad metodológica y facilitando la toma de decisiones en escenarios complejos.

Finalmente, la integración de criterios ambientales y sociales permitirá evaluar el impacto de las decisiones tecnológicas en términos de sostenibilidad y responsabilidad social, alineando la selección de hardware con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Proyecto TecNM 21640.25-P. El primer autor recibió beca de posgrado CONACYT para realizar esta investigación.

Referencias

1. **J. Tovar, J. Solórzano, A. Badillo y G. Rodríguez**, «Internet de las Cosas Aplicado a la Agricultura: Estado Actual,» Lámpsakos, vol. 22, nº 22, pp. 86 - 105, 2019.
2. **D. Navarro, J. Badillo, M. Portillo y S. Pineda**, «Tecnologías y Herramientas del Internet de las Cosas (IoT) para el Desarrollo de Prototipos en Entornos Cotidianos,» Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas, vol. 2, nº 44, pp. 97 - 103, 2024.
3. **P. Kansakar y A. Munir**, «Selecting Microarchitecture Configuration of Processors for Internet of Things,» IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, vol. 8, nº 4, pp. 973 - 985, 2020.
4. **C. Radulescu y M. Radulescu**, «A Hybrid Group Multi-Criteria Approach Based on SAW, TOPSIS, VIKOR, and COPRAS Methods for Complex IoT Selection Problems,» Electronics, vol. 13, nº 4, pp. 789 - 799, 2024.

5. **G. Ilieva y T. Yankova**, «IoT System Selection as a Fuzzy Multi-Criteria Problem,» *Sensors*, vol. 22, nº 11, pp. 4110 - 4122, 2022.
6. **C. Radulescu, R. Boncea y A. Vevera**, «A Multi-Criteria Weighting Approach with Application to Internet of Things,» *Studies in Informatics and Control*, vol. 32, nº 4, pp. 5 - 16, 2023.
7. **H. Klusmann y R. Carnero**, «Multicriteria Analysis for IoT Selection in a Telemetry System,» *Polibits*, vol. 62, nº 2020, pp. 51 - 57, 2020.
8. **M. Şahin y A. Tarhan**, «Evaluation and Selection of Hardware and AI Models for Edge Applications: A Method and A Case Study on UAVs,» *Applied Sciences*, vol. 15, nº 3, pp. 1026 - 1037, 2025.
9. **S. Pugh**, «Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering,» *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 1, nº 1, pp. 278 - 298, 1990.
10. «The Analytic Hierarchy Process - What It Is and How It Is Used,» *Mathematical Modelling*, vol. 9, nº 3, pp. 167 - 176, 1987.
- A. **Salam y U. Raza**, «IOUT Applications in Decision Agriculture, Real-Time Soil Monitoring, and Irrigation Automation,» *de Signals in the Soil: Developments in Internet of Underground Things*, Suiza, Springer Cham, 2020, pp. 321 - 356.
11. **Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari y M. Ayyash**, «Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, nº 4, pp. 2347 - 2376, 2015.
12. **Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista y M. Zorzi**, «Internet of Things for Smart Cities,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, nº 1, pp. 22 - 32, 2014.
13. **O. Bello y S. Zeadally**, «Intelligent Device-to-Device Communication in the Internet of Things,» *IEEE Systems Journal*, vol. 10, nº 3, pp. 1172 - 1182, 2016.
14. **Cariou, L. Moiroux-Arvis, F. Pinet y J. Chanet**, «Internet of Underground Things in Agriculture 4.0: Challenges, Applications and Perspectives,» *Sensors*, vol. 23, nº 8, pp. 4058 - 4068, 2023.
15. **E. Levintal, Y. Ganot, G. Taylor, P. Freer-Smith, K. Suvocarev y H. Dahlke**, «An Underground, Wireless, Open-Source, Low-Cost System for Monitoring Oxygen, Temperature, and Soil Moisture,» *Soil*, vol. 8, nº 1, pp. 85 - 97, 2022.
16. **J. Payero, A. Nafchi, R. Davis y A. Khalilian**, «An Arduino-Based Wireless Sensor Network for Soil Moisture Monitoring Using Decagon EC-5 Sensors,» *Open Journal of Soil Science*, vol. 7, nº 10, pp. 10 - 22, 2017.
17. **Hwang y K. Yoon**, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*, Heidelberg: Springer Berlin, 1981.

Article received on 09/01/2025; accepted on 24/07/2025.

**Corresponding author is Julio Víctor Sánchez-Hernández.*