

**CONVERGENCE BETWEEN IOT SYSTEMS AND CLOUD COMPUTING FOR SMART CITIES: AN IMPACT ASSESSMENT**Diana Carolina Decimavilla-Alarcón<sup>1</sup>**E-mail:** [ddecimavilla@istvr.edu.ec](mailto:ddecimavilla@istvr.edu.ec)**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0375-0216>Lester Fernando Zambrano-Arcos<sup>1</sup>**E-mail:** [lf.zambrano@istvr.edu.ec](mailto:lf.zambrano@istvr.edu.ec)**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-6639-7568><sup>1</sup> Instituto Superior Tecnológico Vicente Rocafuerte. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Decimavilla-Alarcón, D. C., & Zambrano-Arcos, L. F. (2025). Convergencia entre sistemas IoT y Cloud Computing para ciudades inteligentes: Una evaluación de impacto. *Revista UGC*, 3(2), 191-204.**Fecha de presentación:** 28/03/2025**Fecha de aceptación:** 21/04/2025**Fecha de publicación:** 01/05/2025

## RESUMEN

Esta investigación examina la convergencia entre los sistemas de Internet de las Cosas (IoT) y la computación en la nube en el contexto de las ciudades inteligentes, analizando su impacto y las estrategias más efectivas para su implementación, a través de una metodología cualitativa descriptivo-analítica, el estudio realiza una revisión sistemática de la literatura académica reciente (2019-2024), centrándose en la evaluación de diferentes arquitecturas y modelos de integración, los hallazgos revelan que la arquitectura de tres capas emerge como un modelo fundamental, complementada por enfoques más dinámicos como las arquitecturas basadas en agentes y las orientadas a servicios, la incorporación de la Computación en la Niebla (fog computing) representa una evolución significativa, permitiendo el procesamiento de datos más cerca de su fuente y reduciendo la latencia en aplicaciones críticas. Esta investigación contribuye significativamente al campo proporcionando un marco comprensivo para la implementación efectiva de sistemas IoT-Cloud en ciudades inteligentes, destacando la importancia de un enfoque holístico que considere tanto los aspectos tecnológicos como el impacto social y ambiental.

**Palabras clave:**

Ciudades Inteligentes, Internet de las Cosas (IoT), computación en la nube, convergencia tecnológica

## ABSTRACT

This research examines the convergence between Internet of Things (IoT) systems and Cloud computing in the context of smart cities, analyzing their impact and the most effective strategies for their implementation, through a descriptive-analytical qualitative methodology, the study carries out a systematic review of recent academic literature (2019-2024), focusing on the evaluation of different architectures and integration models, the findings reveal that the three-tier architecture emerges as a fundamental model. Complemented by more dynamic approaches such as agent-based and service-oriented architectures, the incorporation of Fog Computing represents a significant evolution, allowing data processing closer to its source and reducing latency in critical applications. This research contributes significantly to the field by providing a comprehensive framework for the effective implementation of IoT-Cloud systems in smart cities, highlighting the importance of a holistic approach that considers both technological aspects and social and environmental impact.

**Keywords:**

Smart Cities, Internet of Things (IoT), cloud computing, technological convergence.

## INTRODUCCIÓN

La convergencia entre los sistemas IoT y Cloud Computing surge como respuesta a la creciente necesidad de transformar las ciudades tradicionales en entornos más inteligentes y eficientes, una tendencia que comenzó a tomar forma a principios de la década de 2010, está transformación da paso al concepto de ciudades inteligentes, que emergió como una respuesta a los desafíos de la urbanización y la necesidad de crear entornos urbanos más eficientes y sostenibles (Feng et al., 2019; Whaiduzzaman et al., 2022; Su et al., 2022), estas ciudades se basan en la integración de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para mejorar la calidad de vida de sus habitantes y optimizar la gestión de recursos.

La adopción de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y la computación en la nube es fundamental para esta transformación, permitiendo la recopilación y análisis de datos en tiempo real para la toma de decisiones informadas (Feng et al., 2019; Khan et al., 2020; Alam, 2021), el desarrollo de ciudades inteligentes busca un equilibrio entre las necesidades de la sociedad, la ecología y la economía, utilizando datos de sensores, dispositivos móviles y redes sociales (Dadwal, 2023), en el contexto actual, las ciudades inteligentes se han convertido en un imperativo para abordar problemas críticos como la congestión del tráfico, la contaminación ambiental y la gestión ineficiente de los servicios públicos (Su et al., 2022; Dange, 2023), estas urbes buscan mejorar la calidad de vida de sus residentes a través de la optimización de la infraestructura, la reducción de residuos y la mejora de la eficiencia económica.

La integración de sistemas IoT permite la monitorización y gestión en tiempo real de diversos aspectos de la ciudad, desde el consumo de energía hasta la seguridad pública, asimismo, esta integración representa un modelo de desarrollo urbano sostenible, que busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las de futuras generaciones (Shenkoya, 2023), el Internet de las Cosas (IoT) y el Cloud Computing están revolucionando la forma en que operan las ciudades (Alam, 2021; Khan et al., 2020; Dadwal, 2023), el IoT proporciona la infraestructura para conectar una amplia gama de dispositivos y sensores que recopilan datos en todo el entorno urbano (Su et al., 2022; Whaiduzzaman et al., 2022).

La computación en la nube, por su parte, ofrece la capacidad de almacenamiento y procesamiento necesarios para analizar esos grandes volúmenes de datos y generar información útil para la toma de decisiones (Alam, 2021; Leal-Sobral et al., 2023; Shenkoya, 2023), en conjunto, estas tecnologías permiten la creación de servicios inteligentes en áreas como el transporte, la salud, la energía y la gestión de residuos, transformando la experiencia urbana de los ciudadanos (Whaiduzzaman et al., 2022), a pesar del gran potencial de la integración de IoT y Cloud Computing, existen brechas en su implementación

efectiva en ciudades inteligentes (Jahantigh et al., 2019; Gunawan et al., 2022; Kuchuk & Malokhvii, 2024).

La falta de estandarización en las plataformas de servicios IoT basados en la nube, la dificultad para manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real, y la ausencia de métodos efectivos para garantizar la seguridad y privacidad son algunos de los desafíos que deben superarse (Kuchuk & Malokhvii, 2024); además, es necesario optimizar la convergencia de estas tecnologías para garantizar un funcionamiento eficiente y reducir los costos operativos (Alam, 2021; Leal-Sobral et al., 2023), la complejidad de los sistemas integrados requiere un enfoque sistemático y una comprensión profunda de las arquitecturas y protocolos involucrados (Tekinerdogan et al., 2023).

El examinar los mecanismos de convergencia entre IoT y Cloud Computing es crucial para maximizar los beneficios potenciales de las ciudades inteligentes (Jahantigh et al., 2019; Mahmood et al., 2022; Gunawan et al., 2022), una integración efectiva puede llevar a una mejora significativa en:

- Eficiencia operativa,
- Reducción del consumo de energía, y
- Optimización de los servicios públicos

Lo que se traduce en una mejor calidad de vida para los habitantes de la ciudad (Feng et al., 2019; Dadwal, 2023; Shenkoya, 2023; Pamudji, 2023); además, al identificar y abordar las brechas existentes, se puede allanar el camino para la creación de ciudades más sostenibles, seguras y centradas en el ciudadano (Gunawan et al., 2022), el análisis de las métricas de evaluación del rendimiento, interoperabilidad, eficiencia energética, seguridad y privacidad es fundamental para guiar el desarrollo de soluciones efectivas e innovadoras.

Al examinar de manera exhaustiva los mecanismos de convergencia existentes entre los sistemas IoT (Internet de las Cosas) y Cloud Computing, con el propósito fundamental de identificar y analizar las estrategias más efectivas que permitan optimizar la implementación de servicios tecnológicos en el contexto de las ciudades inteligentes, esta investigación busca profundizar en la comprensión de las arquitecturas de integración, los modelos de convergencia y las mejores prácticas que faciliten el desarrollo de soluciones urbanas inteligentes, considerando aspectos críticos como el rendimiento, la interoperabilidad y la eficiencia en la gestión de recursos tecnológicos.

Para alcanzar este objetivo general, se plantea realizar una síntesis sistemática de estudios previos sobre arquitecturas de integración IoT-Cloud en entornos urbanos, seguido de un análisis comparativo de diferentes modelos de convergencia tecnológica basado en métricas específicas, para finalmente elaborar un cuadro comparativo

que recopile y sintetice las mejores prácticas y recomendaciones para la implementación exitosa de sistemas IoT-Cloud en el desarrollo de ciudades inteligentes, este enfoque metodológico permitirá establecer una base sólida para la toma de decisiones en futuros proyectos de transformación urbana, considerando tanto los aspectos técnicos como el impacto en la calidad de vida de los ciudadanos.

## METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque metodológico cualitativo de tipo descriptivo-analítico, fundamentado en una revisión sistemática de la literatura científica sobre la convergencia entre sistemas IoT y Cloud Computing en ciudades inteligentes, el proceso investigativo se estructuró en tres fases principales que permitieron abordar el fenómeno de estudio de manera integral y sistemática, comenzando con una exhaustiva revisión de literatura, seguida por un análisis comparativo de arquitecturas y modelos, y culminando con una síntesis que deriva en recomendaciones prácticas para la implementación de estos sistemas, esta aproximación metodológica busca no solo comprender el estado actual del conocimiento en el campo, sino también identificar patrones, tendencias y mejores prácticas que puedan guiar futuras implementaciones en contextos urbanos inteligentes.

La investigación se centró en una revisión sistemática de literatura, utilizando bases de datos académicas de prestigio como IEEE Xplore, Scopus, Web of Science y Science Direct, la búsqueda se delimitó a publicaciones comprendidas entre 2019 y 2024, asegurando la actualidad y relevancia de la información recopilada, se establecieron criterios específicos de búsqueda mediante palabras clave como "IoT AND Cloud Computing", "Smart Cities", "IoT-Cloud Integration", "Edge Computing" y "Fog Computing", priorizando artículos científicos revisados por pares, conferencias internacionales y libros académicos que abordaran directamente la integración de estas tecnologías en el contexto de ciudades inteligentes.

Así mismo el estudio se enfocó en el análisis comparativo de las diferentes arquitecturas y modelos de integración IoT-Cloud identificados en la literatura, este análisis se estructuró mediante un marco analítico que permitió evaluar sistemáticamente los diferentes enfoques arquitectónicos, incluyendo modelos de tres capas, arquitecturas basadas en agentes, sistemas orientados a servicios, plataformas específicas y arquitecturas con computación en niebla, para cada arquitectura, se evaluaron aspectos críticos como el rendimiento, la escalabilidad, la interoperabilidad, la eficiencia energética, la seguridad y la privacidad, estableciendo métricas específicas que permitieran una comparación objetiva entre los diferentes modelos estudiados, este proceso analítico facilitó la identificación de fortalezas y debilidades de cada aproximación, así como su idoneidad para diferentes los contextos.

Por último la investigación se centró en la síntesis de los hallazgos y la elaboración de recomendaciones prácticas, se empleó un método de síntesis narrativa que permitió identificar patrones y tendencias significativas en las arquitecturas analizadas, evaluando la efectividad de diferentes modelos de convergencia y determinando las mejores prácticas en implementaciones exitosas, las recomendaciones se desarrollaron considerando la evidencia empírica de casos de éxito, las lecciones aprendidas de implementaciones previas, aspectos técnicos y operativos, así como factores de sostenibilidad y escalabilidad, este proceso de síntesis se realizó manteniendo un equilibrio entre el rigor académico y la aplicabilidad práctica de las recomendaciones generadas.

Esta metodología diseñada y aplicada permitió un análisis riguroso y sistemático de la convergencia entre sistemas IoT y Cloud Computing en el contexto de las ciudades inteligentes, proporcionando una base sólida para la generación de conocimiento y recomendaciones prácticas en este campo emergente, la estructura metodológica adoptada facilitó no solo la comprensión profunda del fenómeno estudiado, sino también la identificación de oportunidades y desafíos clave para la implementación exitosa de estas tecnologías en entornos urbanos inteligentes, los resultados obtenidos a través de esta aproximación metodológica contribuyen significativamente al cuerpo de conocimiento existente y ofrecen orientaciones valiosas para profesionales y tomadores de decisiones en el ámbito de las ciudades inteligentes.

## DESARROLLO

En el contexto de la transformación digital contemporánea (Wendy, 2024), el desarrollo de las ciudades inteligentes ha experimentado una evolución significativa impulsada por la convergencia tecnológica entre los Sistemas de Internet de las Cosas (IoT) y la Computación en la Nube (Cloud Computing), esta integración representa un paradigma fundamental en la gestión urbana moderna, estableciendo nuevos estándares para la optimización de servicios públicos y la administración eficiente de recursos urbanos, la sinergia entre estas tecnologías emergentes no solo facilita la recopilación y procesamiento de datos en tiempo real, sino que también proporciona una infraestructura robusta para la toma de decisiones basada en evidencia empírica.

En este contexto, la convergencia tecnológica se posiciona como un catalizador esencial para la transformación de las urbes tradicionales (Ketaki, 2024) en ecosistemas urbanos inteligentes, capaces de responder de manera proactiva a las necesidades dinámicas de sus habitantes, la presente investigación aborda el análisis sistemático de la integración entre IoT y Cloud Computing, examinando su impacto en el desarrollo de ciudades inteligentes y evaluando las implicaciones de esta convergencia en la optimización de servicios urbanos, este estudio se

fundamenta en la premisa de que la comprensión profunda de estas tecnologías convergentes es crucial para establecer marcos de implementación efectivos que potencien el desarrollo sostenible y la eficiencia operativa en el contexto urbano contemporáneo, sentando así las bases para una exploración detallada de estos componentes tecnológicos en el marco teórico subsiguiente.

En este marco teórico se aborda el estudio de la convergencia entre los sistemas de Internet de las Cosas (IoT) y Cloud Computing como elementos fundamentales para el desarrollo de las Ciudades Inteligentes, analizando sus características esenciales y componentes principales que permiten la integración efectiva de estas tecnologías, se examinarán las ventajas que esta convergencia aporta al desarrollo urbano, como la optimización de recursos y la mejora en la calidad de vida de los ciudadanos, así como los desafíos significativos que enfrentan las ciudades durante su implementación, incluyendo aspectos de seguridad, privacidad y la necesaria inversión en infraestructura, este análisis permitirá comprender el impacto transformador que esta convergencia tecnológica tiene en la gestión urbana moderna y su papel crucial en la construcción de ciudades más eficientes y sostenibles.

Las ciudades inteligentes se definen como áreas urbanas que utilizan tecnologías de la información y la comunicación (TIC), incluyendo el Internet de las Cosas (IoT) y la computación en la nube, para mejorar la eficiencia de sus operaciones y servicios, gestionar recursos y activos, y aumentar la calidad de vida de sus ciudadanos (Feng et al., 2019; Alam, 2021; Tekinerdogan et al., 2023), estas ciudades buscan optimizar diversos aspectos, como la gestión del transporte, la eficiencia energética, la sostenibilidad ambiental, la seguridad pública, y la prestación de servicios de salud y educación (Shenkoya, 2023), la implementación de tecnologías IoT en las ciudades inteligentes implica la recolección de datos a través de dispositivos digitales y físicos para tomar decisiones informadas y mejorar el rendimiento general de la ciudad.

El concepto de ciudad inteligente se enfoca en el desarrollo del elemento humano utilizando la tecnología (Gunawan et al., 2022), permitiendo una gestión más eficaz de los asuntos públicos, la transformación de una ciudad en una ciudad inteligente requiere la infusión de inteligencia en subsistemas como educación, energía, gestión de residuos, agua, salud e infraestructura (Khan et al., 2020), la construcción de ciudades inteligentes es una tendencia de desarrollo y un sistema de soporte necesario para un estilo de vida moderno (Feng et al., 2019).

Las ciudades inteligentes se caracterizan por el uso de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), incluyendo IoT, sensores, dispositivos, y plataformas de análisis de datos (Alam, 2021; Dadwal, 2023), los componentes incluyen una infraestructura inteligente, transporte inteligente, movilidad inteligente, hogares inteligentes, energía inteligente, estacionamiento inteligente, parques

inteligentes y centros de negocios inteligentes, entre otros, tienen como desafíos la complejidad de la integración de sistemas, la necesidad de garantizar la seguridad y la privacidad de los datos, la interoperabilidad entre sistemas heterogéneos, la gestión de grandes volúmenes de datos, y los costos de implementación y mantenimiento (Leal-Sobral et al., 2023; Tekinerdogan et al., 2023).

Al hablar del Internet de las Cosas (IoT) la investigación se refiere a una red de objetos físicos ("cosas") que están integrados con sensores, software y otras tecnologías, permitiéndoles conectar e intercambiar datos con otros dispositivos y sistemas a través de Internet (Shenkoya, 2023; Ahmed et al., 2023), el término "Internet de las Cosas" fue acuñado en 1999 (Whaiduzzaman et al., 2022), el concepto del IoT se basa en la idea de conectar objetos físicos a internet, lo cual ha evolucionado con el desarrollo de las tecnologías de comunicación e información, inicialmente, internet se utilizaba para conectar computadoras y requería interacción humana, pero el IoT ha extendido esta conexión a objetos físicos y virtuales en el mundo real (Tekinerdogan et al., 2023), el IoT ha crecido rápidamente, impulsado por los avances en las redes de sensores, la computación ubicua y las comunicaciones inalámbricas (Jahantigh et al., 2019).

En el caso de sistema IoT, se compone de sensores inteligentes que tienen capacidad de identificación, dispositivos de identificación por radiofrecuencia (RFID), dispositivos de transmisión inalámbrica, una plataforma de internet y un módulo de comunicación móvil (Feng et al., 2019), estos componentes se pueden organizar en capas: la capa de transporte, la capa de aplicación y la capa de percepción (dispositivos), la capa de red (comunicación) y la capa de aplicación (procesamiento y toma de decisiones) (Gunawan et al., 2022).

IoT es la espina dorsal de las ciudades inteligentes, mejorando el rendimiento de diversos sectores como la salud, energía, construcción, negocios y telecomunicaciones (Shenkoya, 2023), los dispositivos IoT, que pueden incluir desde sensores hasta sistemas más complejos, generan grandes cantidades de datos, lo que a su vez posibilita una mejor toma de decisiones y análisis (Whaiduzzaman et al., 2022; Ahmed et al., 2023), la tecnología IoT se ha desarrollado rápidamente, expandiendo su uso en áreas que van desde la industria hasta la vida cotidiana (Jahantigh et al., 2019), la implementación del IoT en una ciudad requiere la consideración de cuestiones como la interoperabilidad entre diferentes dispositivos y sistemas (Fahmideh & Zowghi, 2020), la seguridad de los datos (Whaiduzzaman et al., 2022) y la gestión eficiente de la energía (Gunawan et al., 2022), el IoT ha revolucionado los estilos de vida tradicionales al proporcionar capacidades de monitoreo y control

IoT tiene múltiples aplicaciones en las ciudades inteligentes, que incluyen la gestión de tráfico (Tekinerdogan et al., 2023; Shenkoya, 2023), estacionamientos inteligentes

(Whaiduzzaman et al., 2022), gestión de energía, respuesta a emergencias, monitoreo ambiental (Leal-Sobral et al., 2023), sistemas de transporte, gestión de residuos, sistemas de salud, y seguridad (Alam, 2021), con todo esto, el IoT permite el desarrollo de ciudades inteligentes, que buscan garantizar un desarrollo sostenible a través de la optimización de recursos y la mejora de la calidad de vida.

La investigación determina la importancia de los modelos por ejemplo La computación en la nube, el cual permite el acceso a recursos informáticos compartidos (como redes, servidores, almacenamiento y software) a través de Internet, bajo demanda (Alam, 2021), la nube ofrece la posibilidad de almacenar, procesar y analizar grandes cantidades de datos generados por dispositivos IoT (Leal-Sobral et al., 2023), abordando así las limitaciones de los dispositivos IoT en cuanto a almacenamiento, potencia y capacidad de procesamiento, la computación en la nube juega un papel importante en el desarrollo de aplicaciones de IoT para ciudades inteligentes (Feng et al., 2019), ofreciendo una infraestructura escalable y eficiente para la gestión de datos (Whaiduzzaman et al., 2022; Ahmed et al., 2023, Tekinerdogan et al., 2023).

En este contexto la implementación de servicios se organiza mediante diferentes modelos que permiten a las organizaciones elegir el nivel de control, gestión y acceso que mejor se adapte a sus necesidades específicas, como se muestra en la Tabla 1, estos modelos se dividen en dos categorías principales: los modelos de servicio, que definen el nivel de gestión y responsabilidad que asume el proveedor de la nube, y los modelos de implementación, que determinan cómo se despliegan y acceden estos servicios, la comprensión de estos modelos es fundamental para tomar decisiones informadas sobre la adopción de tecnologías en la nube y su integración en las estrategias de transformación digital de las organizaciones.

Tabla 1. Modelos de computación en la nube.

Modelos de servicio (IaaS, PaaS, SaaS)	Modelos de implementación (público, privado, híbrido)
<p>IaaS (Infraestructura como Servicio): Proporciona recursos informáticos básicos como servidores, almacenamiento y redes a través de internet (Dadwal, 2023).</p> <p>PaaS (Plataforma como Servicio): Ofrece una plataforma para desarrollar, ejecutar y administrar aplicaciones sin tener que gestionar la infraestructura subyacente (Jahantigh et al., 2019).</p> <p>SaaS (Software como Servicio): Permite acceder a aplicaciones a través de internet, sin necesidad de instalarlas en los dispositivos (Jahantigh et al., 2019).</p>	<p>Nube Pública: Servicios disponibles a través de internet para el público en general (Alam, 2021).</p> <p>Nube Privada: Infraestructura utilizada exclusivamente por una organización (Alam, 2021).</p> <p>Nube Híbrida: Combinación de nubes públicas y privadas, permitiendo la flexibilidad y escalabilidad (Alam, 2021).</p>

Tras comprender la estructura y los modelos fundamentales de la computación en la nube, es esencial examinar las ventajas específicas que ofrece esta tecnología y los desafíos que presenta su implementación en entornos urbanos inteligentes, la adopción de servicios en la nube, independientemente del modelo seleccionado, conlleva una serie de beneficios transformadores para las ciudades y sus habitantes, así como retos significativos que deben abordarse de manera estratégica para garantizar una implementación exitosa, como se detalla en la Tabla 2, las principales áreas de aplicación en ciudades inteligentes según Shenkoya (2023), abarcan desde la gestión de infraestructura tecnológica hasta el desarrollo de servicios sociales.

Tabla 2. Áreas de aplicación de la computación en la nube en ciudades inteligentes.

Gestión de Infraestructura Tecnológica	Gestión de Recursos y Servicios Básicos
<ul style="list-style-type: none"> <li>Gestión de ancho de banda</li> <li>Gestión de latencia</li> <li>Redes inteligentes</li> <li>Seguridad</li> <li>Clasificación de aplicaciones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gestión de energía</li> <li>Energía inteligente</li> <li>Gestión de agua inteligente</li> <li>Gestión de residuos inteligente</li> <li>Iluminación inteligente</li> </ul>

<b>Movilidad y Transporte:</b>	<b>Infraestructura y Servicios Urbanos:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estacionamiento inteligente</li> <li>• Transporte inteligente</li> <li>• Movilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edificios inteligentes</li> <li>• Servicios municipales inteligentes</li> <li>• Gestión de recursos</li> </ul>
<b>Servicios Sociales y Desarrollo Humano</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atención médica inteligente</li> <li>• Educación inteligente</li> <li>• Ciudadanos inteligentes</li> </ul>	

Mientras que los desafíos incluyen seguridad, privacidad y la necesidad de una gestión adecuada de grandes volúmenes de datos (Alam, 2021), la integración de la computación en la nube con el IoT se considera esencial para superar las limitaciones del IoT, como la accesibilidad, el análisis y el cálculo de datos (Jahantigh et al., 2019; Ahmed et al., 2023), la adopción de la computación en la nube permite reducir los costos y los requisitos de mantenimiento de las soluciones IoT (Leal-Sobral et al., 2023); además, puede fomentar la colaboración entre proyectos de ciudades inteligentes.

En el contexto de las ciudades inteligentes, la convergencia entre tecnologías emerge como un factor crucial para la transformación digital urbana se encuentra la integración del IoT con la computación en la nube que combina las capacidades de recolección de datos del IoT con la potencia de procesamiento y almacenamiento de la nube (Jahantigh et al., 2019; Ahmed et al., 2023), esta integración permite superar las limitaciones del IoT (Alam, 2021), como el almacenamiento y el procesamiento de grandes volúmenes de datos, la combinación de estas dos tecnologías facilita la creación de nuevas oportunidades, como el “Thing as Service” y los “Smart Things”.

La integración IoT-Cloud es esencial para habilitar la funcionalidad de las aplicaciones de ciudades inteligentes (Alam, 2021); tales como la gestión de transporte, la gestión de energía, y la prestación de servicios públicos (Shenkoya, 2023), la arquitectura de integración puede involucrar una plataforma basada en la nube que gestiona la información recopilada por los dispositivos IoT, permitiendo su análisis y visualización, para comprender mejor esta sinergia tecnológica, es fundamental profundizar en el concepto de convergencia y sus implicaciones en el desarrollo de sistemas urbanos inteligentes, que resulta ser es la combinación de diferentes tecnologías en un sistema único integrado, lo cual permite superar las limitaciones individuales de cada tecnología y crear nuevas funcionalidades y servicios (Jahantigh et al., 2019).

En este contexto, la convergencia IoT-Cloud se refiere a la integración de las capacidades de recopilación de datos del IoT con las capacidades de almacenamiento,

procesamiento y análisis del cloud computing (Ahmed et al., 2023), esta integración tecnológica ofrece una serie de ventajas significativas que transforman la manera en que las ciudades gestionan sus recursos y servicios, la integración permite un procesamiento más eficiente de los datos generados por los dispositivos IoT, mejorando la toma de decisiones en las ciudades inteligentes, también facilita el acceso a datos remotos, ofrece opciones de servicio más amplias y proporciona almacenamiento rentable, la combinación de estas dos tecnologías también promueve la creación de nuevas aplicaciones y servicios que mejoran la vida de los ciudadanos (Alam, 2021).

Sin embargo, junto con estas oportunidades, surgen importantes retos que deben ser considerados y abordados estratégicamente, los cuales incluyen la necesidad de abordar la seguridad en la integración, la falta de estandarización en los protocolos de comunicación, y la complejidad de gestionar grandes volúmenes de datos en tiempo real (Jahantigh et al., 2019), también existe la necesidad de abordar la interoperabilidad entre diferentes dispositivos y plataformas (Ahmed et al., 2023), para hacer frente a estos desafíos y maximizar los beneficios de la integración.

Se han desarrollado diversos modelos arquitectónicos que proporcionan marcos de referencia para su implementación, como son las arquitecturas de referencia que incluyen modelos basados en tres capas (dispositivos, red, aplicación), plataformas de integración y modelos que incorporan la computación en el borde y la niebla para optimizar el procesamiento y la latencia (Whaiduzzaman et al., 2022), estas arquitecturas buscan garantizar una integración fluida y eficiente entre los diferentes componentes (Jahantigh et al., 2019; Ahmed et al., 2023).

Además para implementar efectivamente la convergencia entre IoT y Cloud Computing, es fundamental comprender las arquitecturas que facilitan esta integración y sus componentes esenciales, las arquitecturas de integración IoT-Cloud se refieren a los modelos y diseños que definen cómo se conectan e interactúan los dispositivos IoT con la infraestructura de la nube, estas arquitecturas buscan garantizar una comunicación eficiente, segura e interoperable entre ambos sistemas (Jahantigh et al., 2019; Fahmideh & Zowghi, 2020), las arquitecturas de referencia para la integración del IoT con la nube a menudo incluyen capas para la percepción, la red y las aplicaciones (Tekinerdogan et al., 2023).

Algunas arquitecturas se basan en un modelo de tres capas, que comprende la capa de IoT, la capa perimetral (edge), y la capa de la nube (Mahmood et al., 2022), en estas arquitecturas, la capa perimetral puede proporcionar recursos de procesamiento cerca de la fuente de datos, reduciendo la latencia y el consumo de energía (Ahmed et al., 2023), varias arquitecturas también utilizan middleware para facilitar la traducción de datos y la comunicación entre diferentes sistemas (Tekinerdogan

et al., 2023), los diseñadores de arquitecturas para ciudades inteligentes deben considerar aspectos como la documentación, la interoperabilidad, la seguridad, y las funcionalidades requeridas para el sistema (Fahmideh & Zowghi, 2020).

Mientras las arquitecturas proporcionan el marco técnico para la integración, es crucial examinar cómo estas tecnologías contribuyen a uno de los objetivos fundamentales de las ciudades inteligentes, la sostenibilidad, que se refiere a la capacidad de estas urbes para mantener un equilibrio entre el crecimiento económico, el bienestar social y la protección del medio ambiente, a largo plazo (Khan et al., 2020), la integración de IoT y cloud computing juega un papel crucial en este aspecto, al permitir una gestión más eficiente de los recursos y la energía, las ciudades sostenibles buscan reducir su huella de carbono, mejorar la calidad del aire y del agua, y promover prácticas de consumo responsables.

Además, del uso de sensores y sistemas inteligentes de gestión de residuos, transporte y energía permite a las ciudades tomar decisiones basadas en datos para reducir su impacto ambiental, adicionalmente, la sostenibilidad en las ciudades inteligentes también implica el fomento de la equidad social, el acceso a oportunidades y la participación ciudadana en el desarrollo de la ciudad, en este contexto, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) actúan como catalizadores de la sostenibilidad, apoyando el monitoreo y la optimización de los sistemas urbanos (Shenkoya, 2023).

Para alcanzar los objetivos de sostenibilidad y eficiencia en las ciudades inteligentes, un factor técnico crítico que debe abordarse es la interoperabilidad entre los diversos sistemas y dispositivos desplegados, la interoperabilidad en sistemas IoT se refiere a la capacidad de diferentes dispositivos, plataformas y sistemas para comunicarse e intercambiar datos de manera efectiva y sin problemas (Tekinerdogan et al., 2023), en el contexto de las ciudades inteligentes, donde se utilizan diversas tecnologías de diferentes proveedores, la interoperabilidad es esencial para crear un ecosistema de IoT funcional y cohesivo.

La falta de interoperabilidad puede llevar a la fragmentación de los sistemas, la duplicación de esfuerzos y la pérdida de datos valiosos, la adopción de estándares y protocolos comunes es crucial para garantizar la interoperabilidad, además, las arquitecturas de referencia basadas en capas y el uso de middleware pueden facilitar la traducción de datos y la comunicación entre diferentes sistemas (Tekinerdogan et al., 2023), la interoperabilidad también implica la capacidad de diferentes sistemas para trabajar juntos en una misma solución, de forma que los datos de un sistema sean interpretables por otros, logrando así una mayor eficiencia en las operaciones de la ciudad (Fahmideh & Zowghi, 2020).

La interoperabilidad, aunque esencial, debe equilibrarse cuidadosamente con otro aspecto fundamental que es la seguridad de los sistemas integrados, la seguridad en IoT y cloud computing es un aspecto crítico para garantizar la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los datos en las ciudades inteligentes, los sistemas de IoT, con su gran cantidad de dispositivos conectados, presentan una superficie de ataque amplia y variada la seguridad en IoT implica la protección de los dispositivos, la comunicación y los datos contra accesos no autorizados, ataques cibernéticos y manipulaciones.

La computación en la nube también presenta desafíos de seguridad, ya que los datos se almacenan y procesan en centros de datos que pueden ser vulnerables, las mejores prácticas de seguridad incluyen la autenticación y autorización de dispositivos y usuarios, el cifrado de datos, la gestión de vulnerabilidades, y la implementación de mecanismos de detección y respuesta a incidentes, es importante destacar que la seguridad debe ser considerada como una parte integral del diseño de los sistemas IoT y cloud computing desde el inicio, y no como una solución a posteriori (Fahmideh & Zowghi, 2020).

Para abordar estos desafíos de manera estructurada, una de las aproximaciones más efectivas es la implementación de arquitecturas basadas en capas, que resultan ser un modelo común utilizado para estructurar sistemas IoT, particularmente en contextos de ciudades inteligentes, esta arquitectura generalmente consta de:

- la capa de percepción, donde se encuentran los dispositivos IoT, los sensores y los actuadores que recopilan datos del entorno;
- la capa de red, que se encarga de la comunicación y el transporte de datos entre los dispositivos y la nube; y
- la capa de aplicación, donde los datos son procesados, analizados y utilizados para la toma de decisiones y la prestación de servicios (Mahmood et al., 2022; Ahmed et al., 2023).

Esta estructura modular facilita la gestión y el desarrollo de sistemas IoT complejos, al permitir la separación de responsabilidades y la mejora de la interoperabilidad, la capa de red suele utilizar protocolos estandarizados como MQTT, CoAP y HTTP (Tekinerdogan et al., 2023), esta arquitectura es una de las más elementales en el contexto de IoT y sirve como base para modelos más sofisticados, también permite una distribución de tareas y funciones dentro de un sistema (Ahmed et al., 2023).

Como evolución natural de estas arquitecturas y en respuesta a las necesidades específicas de procesamiento en tiempo real, han surgido nuevos paradigmas de computación distribuida, como es el caso de la computación en el borde (edge computing) y la niebla (fog computing) son modelos de computación que buscan acercar el

procesamiento de datos al lugar donde se generan, por ejemplo:

- Edge computing se refiere al procesamiento que se realiza directamente en los dispositivos IoT o en las proximidades de estos, lo que reduce la latencia y el consumo de ancho de banda al minimizar la necesidad de enviar todos los datos a la nube.
- Fog computing, por otro lado, actúa como una capa intermedia entre los dispositivos IoT y la nube, proporcionando capacidades de procesamiento, almacenamiento y networking más cerca de la fuente de datos que la nube centralizada (Jahantigh et al., 2019; Kuchuk & Malokhvii, 2024).

Estas arquitecturas son particularmente útiles para aplicaciones en tiempo real, como el control de tráfico, el monitoreo de la salud y la gestión de emergencias, donde la latencia puede ser un factor crítico (Kuchuk & Malokhvii, 2024), al reducir la cantidad de datos enviados a la nube, edge y fog computing también contribuyen a la mejora de la seguridad y privacidad de la información, la adopción de estos modelos de computación permite una distribución más eficiente de los recursos y mejora el rendimiento general de los sistemas de IoT (Jahantigh et al., 2019).

En el panorama actual de las ciudades inteligentes, donde la generación masiva de datos se ha convertido en una constante, el análisis de datos emerge como una herramienta fundamental para la transformación urbana efectiva, el análisis de datos en ciudades inteligentes implica la recopilación, procesamiento y extracción de conocimiento útil de grandes volúmenes de datos generados por dispositivos IoT y otros sistemas urbanos (Alam, 2021; Dadwal, 2023), este proceso permite a las ciudades tomar decisiones basadas en evidencia, optimizar operaciones y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos (Shenkoya, 2023), los datos provienen de diversas fuentes, incluyendo sensores, cámaras, sistemas de transporte, redes sociales y registros públicos.

Las plataformas de gestión de datos y visualización ayudan a los administradores a comprender y aprovechar los conocimientos del análisis, lo que es esencial para la creación de estrategias y políticas efectivas (Alam, 2021; Dadwal, 2023), el uso de estos datos y análisis permite que las ciudades se conviertan en sistemas interconectados, donde la información de un sector puede influir en otros, por ejemplo, datos sobre el flujo de agua pueden ser indicadores clave para la gestión de inundaciones y la planificación de rutas de transporte.

Es importante destacar que, la diversidad de los datos, unidades de medida y calidad proveniente de diversos sensores y fuentes pueden ser un desafío a la hora de realizar un análisis integral y tomar decisiones efectivas, la estandarización de estos datos es crucial para una correcta integración (Dadwal, 2023); asimismo, el análisis de grandes volúmenes de datos requiere de expertos y sistemas de inteligencia artificial.

En la implementación y desarrollo de sistemas IoT-Cloud para ciudades inteligentes, la evaluación objetiva del rendimiento y efectividad se convierte en un componente crítico para el éxito a largo plazo, es importante medir el rendimiento, la eficacia y la sostenibilidad de los sistemas implementados (Ahmed et al., 2023), estas métricas son cruciales para asegurar que las soluciones adoptadas cumplen con los objetivos de una ciudad inteligente (Dadwal, 2023), proporcionando información valiosa sobre cómo optimizar las operaciones y la calidad de vida de los ciudadanos (Su et al., 2022), a continuación, se definen las métricas clave para la investigación, en el caso del Rendimiento en sistemas IoT-Cloud, se evalúan mediante la eficiencia en la recopilación, el procesamiento y la transferencia de datos, el tiempo de respuesta de los sistemas, y la capacidad de gestionar grandes volúmenes de datos, la latencia y el ancho de banda son métricas clave para evaluar el rendimiento (Jahantigh et al., 2019).

Es importante recalcar la capacidad de los sistemas para trabajar de manera conjunta a pesar de las diferencias en protocolos y tecnologías es un factor clave (Tekinerdogan et al., 2023), es importante garantizar la comunicación fluida entre diferentes dispositivos y plataformas para que el sistema funcione correctamente, la eficiencia energética y sostenibilidad representan otro pilar fundamental en la evaluación, y se evalúa mediante el consumo de energía de los dispositivos, la infraestructura y los centros de datos, y la capacidad del sistema para operar de manera sostenible a largo plazo (Shenkoya, 2023), la eficiencia energética es un factor clave en la sostenibilidad de las ciudades inteligentes.

Finalmente, la evaluación de la seguridad y privacidad en sistemas convergentes se establece como un componente crítico se evalúa mediante la capacidad del sistema para proteger los datos sensibles, garantizar la autenticación de los dispositivos y prevenir accesos no autorizados (Alam, 2021; Tekinerdogan et al., 2023), la seguridad y la privacidad son fundamentales para garantizar la confianza de los ciudadanos en los sistemas inteligentes.

La presente investigación considera importante la creación de una tabla que se ha estructurado siguiendo principios metodológicos fundamentales de organización y síntesis de la información, se dispone en cinco columnas (Concepto, Definición/Características, Componentes, Ventajas y Desafíos) respondiendo a la necesidad de presentar una visión holística y sistemática de la convergencia entre IoT y Cloud Computing en el contexto de las Ciudades Inteligentes, esta estructura matricial permite una comparación transversal de los elementos clave identificados en la literatura revisada, facilitando la comprensión de las interrelaciones entre los diferentes conceptos y sus aspectos fundamentales, la selección de estas categorías específicas se fundamenta en el método de análisis de contenido cualitativo.

Así mismo se han identificado patrones recurrentes en la literatura científica consultada, permitiendo una categorización que abarca tanto aspectos técnicos como funcionales, como se presenta en la Tabla 3, la progresión lógica desde los conceptos más generales hasta los más específicos, refleja un enfoque deductivo que facilita la comprensión gradual de la complejidad del ecosistema tecnológico en las ciudades inteligentes, además, la inclusión de ventajas y desafíos para cada concepto permite una evaluación crítica y balanceada, esencial para una comprensión integral del tema.

Tabla 3. Análisis sistemático de la convergencia IoT y Cloud Computing.

Concepto	Definición/Características	Componentes	Ventajas	Desafíos
Ciudades Inteligentes (Smart Cities)	Áreas urbanas que utilizan TIC, IoT y computación en la nube para mejorar la eficiencia de operaciones y servicios.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Infraestructura inteligente</li> <li>•Transporte inteligente</li> <li>•Hogares inteligentes</li> <li>•Energía inteligente</li> <li>•Centros de negocios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestión eficiente de recursos</li> <li>• Mejor calidad de vida</li> <li>•Sostenibilidad ambiental</li> <li>• Optimización de servicios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integración de sistemas</li> <li>• Seguridad y privacidad</li> <li>• Costos de implementación</li> <li>•Interoperabilidad</li> </ul>
Internet de las Cosas (IoT)	Red de objetos físicos integrados con sensores y software para intercambiar datos a través de Internet.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensores inteligentes</li> <li>• Dispositivos RFID</li> <li>• Módulos de comunicación</li> <li>• Plataformas de conexión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recolección de datos en tiempo real</li> <li>•Automatización de procesos</li> <li>• Monitoreo continuo</li> <li>• Toma de decisiones informada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguridad de dispositivos</li> <li>•Gestión de energía</li> <li>•Interoperabilidad</li> <li>• Mantenimiento</li> </ul>
Computación en la Nube (Cloud Computing)	Modelo que permite acceso a recursos informáticos compartidos bajo demanda a través de Internet.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IaaS (Infraestructura)</li> <li>• PaaS (Plataforma)</li> <li>• SaaS (Software)</li> <li>• Modelos híbridos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escalabilidad</li> <li>• Reducción de costos</li> <li>• Flexibilidad</li> <li>• Acceso global</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguridad de datos</li> <li>• Privacidad</li> <li>• Gestión de volumen</li> <li>• Dependencia de Internet</li> </ul>
Integración IoT-Cloud	Convergencia que combina la recolección de datos IoT con el procesamiento y almacenamiento en la nube.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arquitectura de tres capas</li> <li>• Middleware</li> <li>• Edge Computing</li> <li>• Fog Computing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor eficiencia</li> <li>• Mejor análisis de datos</li> <li>• Optimización de recursos</li> <li>• Nuevos servicios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estandarización</li> <li>• Complejidad técnica</li> <li>• Gestión de datos</li> <li>• Comunicación</li> </ul>

En la revisión sistemática de la literatura sobre arquitecturas de integración IoT-Cloud para ciudades inteligentes, los estudios previos han revelado una evolución significativa en el diseño e implementación de estas infraestructuras tecnológicas, el análisis de la literatura académica destaca la diversidad de aproximaciones arquitectónicas que han emergido para abordar los desafíos específicos de la convergencia entre IoT y Cloud Computing en entornos urbanos inteligentes, los investigadores han documentado extensivamente distintos modelos arquitectónicos, desde estructuras fundamentales de tres capas hasta soluciones más avanzadas que incorporan computación en la niebla y sistemas basados en agentes.

Estas investigaciones previas subrayan la importancia crítica de considerar aspectos como la escalabilidad, la interoperabilidad y la seguridad en el diseño de arquitecturas de integración, elementos que han sido identificados consistentemente como factores clave para el éxito en la implementación de sistemas IoT-Cloud, la síntesis de estos estudios revela una tendencia hacia arquitecturas más flexibles y adaptativas que pueden responder eficientemente a las crecientes demandas de procesamiento de datos y gestión de servicios en las ciudades inteligentes, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en este campo, a continuación, se detalla de manera estructurada los diferentes enfoques para integrar IoT y Cloud Computing en ciudades inteligentes:

En el ámbito de la integración IoT-Cloud para ciudades inteligentes, la arquitectura del sistema constituye la columna vertebral que determina el éxito de la implementación, los estudios analizados presentan una diversidad de

aproximaciones arquitectónicas, cada una diseñada para abordar desafíos específicos en este campo, los estudios analizados presentan una variedad de arquitecturas para la integración de IoT y Cloud Computing en ciudades inteligentes, además, entre las diversas propuestas arquitectónicas, el modelo de tres capas emerge como una estructura fundamental que proporciona un marco robusto para la organización de sistemas IoT-Cloud, por ejemplo la capa IoT (dispositivos y sensores), la capa de borde (procesamiento cercano a la fuente de datos) y la capa de nube (almacenamiento y análisis a gran escala) (Mahmood et al., 2022), esta arquitectura permite una gestión jerárquica de los datos y una distribución eficiente de las tareas de procesamiento.

Mientras el modelo de tres capas establece una estructura jerárquica, las arquitecturas basadas en agentes introducen un enfoque más dinámico y flexible para la gestión de datos, donde entidades de software autónomas (agentes) colaboran para gestionar los datos de los sensores (Jahantigh et al., 2019), por ejemplo, ACOSO es un middleware basado en agentes para sensores inteligentes, y Bodycloud es una plataforma de infraestructura en la nube aplicada a sistemas basados en sensores a gran escala.

La necesidad de garantizar una comunicación fluida entre diferentes componentes del sistema ha llevado al desarrollo de arquitecturas orientadas a servicios, que en algunos estudios proponen el uso de arquitecturas orientadas a servicios para lograr la interoperabilidad entre diferentes dispositivos y servicios IoT, estas arquitecturas se basan en el intercambio de mensajes y la definición de interfaces estandarizadas (Whaiduzzaman et al., 2022), la maduración de estas arquitecturas ha llevado al desarrollo de plataformas especializadas que integran las mejores prácticas y lecciones aprendidas, con las que se han desarrollado plataformas específicas como CLOUDIoT (Jahantigh et al., 2019), que buscan combinar las ventajas del IoT y el Cloud Computing, y también Cloud of Things (CoT), estas plataformas se centran en resolver problemas como la accesibilidad a los datos y la capacidad de cómputo.

Los requisitos de procesamiento en tiempo real y la necesidad de reducir la latencia han propiciado la incorporación de arquitecturas con computación de niebla (fog), dada la necesidad de reducir la latencia en el procesamiento de datos, las arquitecturas que integran la computación en la niebla se han vuelto relevantes (Jahantigh et al., 2019; Kuchuk & Malokhvii, 2024), la computación en niebla permite realizar parte del procesamiento cerca de los dispositivos IoT, mientras que el resto se envía a la nube, por otra parte el análisis sistemático de estas diferentes aproximaciones arquitectónicas revela tendencias y patrones significativos en el campo, por ejemplo:

- Énfasis en la escalabilidad, en el cual existe un interés creciente en diseñar sistemas escalables que puedan

manejar el gran volumen de datos generados por dispositivos IoT en ciudades inteligentes ( (Jahantigh et al., 2019; Alam, 2021).

- Importancia de la interoperabilidad, es la necesidad de lograr la interoperabilidad entre diferentes dispositivos, plataformas y servicios es un tema recurrente en los estudios analizados (Tekinerdogan et al., 2023).
- Preocupación por la seguridad y la privacidad, la seguridad y la privacidad de los datos son preocupaciones importantes en la implementación de soluciones IoT en ciudades inteligentes. Muchos estudios proponen mecanismos para asegurar la confidencialidad e integridad de la información (Jahantigh et al., 2019; Whaiduzzaman et al., 2022; Tekinerdogan et al., 2023; Leal-Sobral et al., 2023).
- Integración con otras tecnologías, los estudios también exploran la integración de IoT y Cloud Computing con otras tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y blockchain (Whaiduzzaman et al., 2022; Su et al., 2022; Ahmed et al., 2023).
- Necesidad de estandarización, hay un reconocimiento de la falta de estandarización en la integración de estas tecnologías, lo que dificulta la implementación de soluciones interoperables y escalables (Jahantigh et al., 2019).
- Uso de protocolos, algunos estudios indican que MQTT y RESTful HTTP son opciones populares para la comunicación en sistemas de IoT y cloud, aunque también se explora el potencial de CoAP como un protocolo estándar para mensajería IoT (Jahantigh et al., 2019).
- Aplicaciones, se han estudiado diversas aplicaciones de esta integración, incluyendo sistemas de transporte inteligente, gestión de energía, monitoreo ambiental, salud y gestión de residuos (Jahantigh et al., 2019; Whaiduzzaman et al., 2022; Shenkoya, 2023, Pamudji, 2023).

La implementación práctica de estas arquitecturas se materializa en una amplia gama de aplicaciones urbanas, demostrando su versatilidad y efectividad.

### Comparación de modelos de convergencia

La convergencia entre IoT y Cloud Computing ha dado lugar a diversos modelos arquitectónicos, cada uno diseñado para abordar desafíos específicos en la implementación de ciudades inteligentes, la arquitectura de tres capas emerge como un modelo fundamental que organiza las funcionalidades en niveles claramente definidos: dispositivos IoT para la recopilación de datos, procesamiento en el borde para reducir la latencia, y gestión en la nube para el almacenamiento y análisis a gran escala, este enfoque jerárquico permite una distribución eficiente de tareas y optimiza el rendimiento del sistema al procesar datos cerca de su fuente, lo que resulta particularmente

beneficioso en aplicaciones que requieren respuestas en tiempo real.

Las arquitecturas basadas en agentes y las orientadas a servicios (SOA) representan enfoques más dinámicos para la gestión de datos en entornos urbanos inteligentes, en el caso de las arquitecturas basadas en agentes, el sistema se construye sobre entidades de software autónomas que colaboran entre sí, utilizando middlewares como ACOSO y plataformas como Bodycloud para facilitar la gestión de datos de sensores a gran escala, por su parte, las arquitecturas SOA se centran en establecer interfaces estandarizadas y protocolos de comunicación que garanticen la interoperabilidad entre diferentes sistemas y servicios, permitiendo una mayor flexibilidad y reutilización de componentes.

Así mismo las plataformas específicas como CLOUDIoT y CoT representan soluciones más especializadas que integran las capacidades de IoT y Cloud Computing, estas plataformas han sido diseñadas para abordar necesidades particulares en el contexto de las ciudades inteligentes, incorporando dispositivos IoT, middleware específico y servicios de gestión personalizados, su enfoque integrado permite optimizar el rendimiento para casos de uso específicos, proporcionando soluciones más eficientes y adaptadas a los requerimientos particulares de cada implementación.

La incorporación de la computación en la niebla (fog computing) representa una evolución significativa en las arquitecturas de convergencia IoT-Cloud, este modelo introduce nodos de procesamiento intermedios entre los

dispositivos IoT y la nube, permitiendo realizar operaciones de procesamiento más cerca de la fuente de datos, la reducción de la latencia y la capacidad de procesamiento en tiempo real que ofrece esta arquitectura la hacen especialmente valiosa para aplicaciones críticas en ciudades inteligentes, como la gestión del tráfico, el monitoreo de la seguridad y la respuesta a emergencias.

Cada uno de estos modelos de convergencia aporta beneficios únicos al ecosistema de las ciudades inteligentes y su selección dependerá de factores como los requisitos específicos de la aplicación, la escala del despliegue, las restricciones de latencia y los recursos disponibles, la tendencia actual muestra una evolución hacia arquitecturas híbridas que combinan elementos de diferentes modelos para crear soluciones más robustas y adaptables, la comprensión profunda de las características y beneficios de cada modelo es fundamental para los profesionales expertos en toma de decisiones involucrados en el desarrollo de infraestructuras urbanas inteligentes, permitiendo seleccionar la arquitectura más apropiada para cada proyecto específico.

Los modelos de convergencia se han analizado principalmente por sus componentes y enfoques, pero no se han dado métricas de rendimiento concretas en las fuentes. Sin embargo, podemos agrupar los modelos según su enfoque y analizar sus características principales. Como se presenta en la Tabla 4, cada modelo de convergencia ofrece una aproximación única a la integración entre IoT y Cloud Computing, con sus propios componentes clave y beneficios específicos que responden a diferentes necesidades y casos de uso.

Tabla 4. Análisis comparativo de modelos de convergencia IoT-Cloud.

Modelo de Convergencia	Descripción	Componentes Clave	Beneficios
Arquitectura de tres capas	Distribuye las funcionalidades entre tres niveles: dispositivos, procesamiento en el borde y gestión en la nube (Whaiduzzaman et al., 2022).	Capa IoT (sensores, actuadores), capa de borde (procesamiento cercano a la fuente de datos) y capa de nube (almacenamiento, análisis).	Gestión jerárquica de datos, distribución eficiente de tareas. Permite reducir la latencia al procesar datos localmente.
Arquitectura basada en agentes	Agentes de software autónomos que interactúan para gestionar los datos de los sensores.	Agentes de software colaborativos, middleware (ejemplo ACOSO), plataforma en la nube (ejemplo Bodycloud) (Whaiduzzaman et al., 2022)	Mayor flexibilidad y adaptabilidad. Permite la colaboración entre diferentes sistemas de sensores.
Arquitectura orientada a servicios (SOA)	Define una arquitectura basada en el intercambio de mensajes e interfaces estandarizadas para lograr la interoperabilidad.	Servicios, interfaces estandarizadas, protocolos de comunicación (Whaiduzzaman et al., 2022).	Interoperabilidad entre diferentes sistemas, reutilización de componentes.
Plataformas específicas (CLOUDIoT, CoT)	Plataformas diseñadas específicamente para combinar IoT y Cloud Computing con funcionalidades particulares.	Dispositivos IoT, plataforma en la nube, middleware específico, servicios de gestión (Jahantigh et al., 2019)	Soluciones integradas, optimizadas para casos de uso particulares (Jahantigh et al., 2019)
Arquitecturas con computación de niebla (fog)	Integra la computación en niebla para realizar parte del procesamiento cerca de los dispositivos y reducir la latencia.	Dispositivos IoT, nodos de niebla, plataforma en la nube, protocolos de comunicación (Jahantigh et al., 2019; Kuchuk & Malokhvii, 2024).	Reducción de la latencia, procesamiento de datos en tiempo real (Jahantigh et al., 2019; Kuchuk & Malokhvii, 2024).

## Cuadro comparativo de mejores prácticas

La implementación exitosa de sistemas IoT-Cloud en ciudades inteligentes requiere un enfoque metódico y bien estructurado que considere las mejores prácticas establecidas por expertos y profesionales del campo. Estas recomendaciones constituyen una guía fundamental para asegurar que la integración sea efectiva, segura y sostenible a largo plazo, abarcando aspectos técnicos, operativos y estratégicos que son cruciales para el éxito del proyecto.

La base de una integración efectiva comienza con la estandarización de interfaces y protocolos, junto con un diseño modular y escalable. La adopción de estándares abiertos como MQTT, REST y CoAP no solo facilita la interoperabilidad entre dispositivos y plataformas, sino que también permite la expansión futura del sistema. Este enfoque se complementa con una arquitectura modular que puede adaptarse al crecimiento orgánico de la ciudad y la incorporación de nuevas tecnologías, asegurando la longevidad y relevancia del sistema.

La seguridad y la gestión de datos representan pilares fundamentales en la implementación de estos sistemas. La incorporación de medidas de seguridad desde el diseño inicial, incluyendo cifrado robusto, autenticación de dispositivos y políticas de acceso bien definidas, es esencial para proteger la infraestructura y los datos de los ciudadanos. Paralelamente, la gestión efectiva de grandes

volúmenes de datos requiere una estrategia que combine plataformas de almacenamiento escalables con técnicas avanzadas de procesamiento y análisis en tiempo real.

La optimización del rendimiento se logra mediante la implementación estratégica de procesamiento en el borde y sistemas de monitorización centralizados. El edge computing reduce la latencia en aplicaciones críticas que requieren respuestas inmediatas, mientras que una gestión centralizada permite supervisar y controlar eficientemente todos los componentes del sistema. Esta combinación asegura un rendimiento óptimo y una respuesta ágil a las necesidades operativas.

El aprovechamiento de plataformas cloud establecidas y la adopción de arquitecturas de referencia proporcionan un marco sólido para el desarrollo y la implementación, la utilización de servicios de proveedores reconocidos como AWS, Google Cloud y Azure no solo reduce los costos operativos, sino que también acelera el desarrollo de aplicaciones IoT. Además, seguir una arquitectura de referencia probada ayuda a evitar errores comunes y asegura que el sistema se construya sobre fundamentos sólidos y bien documentados, como se detalla en la Tabla 5, existe un conjunto comprehensivo de mejores prácticas y recomendaciones que guían una integración efectiva de IoT y Cloud Computing en el contexto de ciudades inteligentes.

Tabla 5. Marco integral de mejores prácticas para la integración IoT-Cloud en ciudades inteligentes.

Mejores Prácticas	Recomendaciones para la Integración Efectiva
Estandarización de interfaces y protocolos	Adoptar estándares abiertos y protocolos comunes (MQTT, REST, CoAP) para asegurar la interoperabilidad entre dispositivos y plataformas.
Diseño modular y escalable	Desarrollar sistemas basados en módulos reutilizables y escalables que puedan adaptarse al crecimiento de la ciudad y la incorporación de nuevos dispositivos y servicios.
Seguridad y privacidad desde el diseño	Implementar medidas de seguridad desde las primeras etapas del diseño del sistema, incluyendo cifrado de datos, autenticación de dispositivos y políticas de acceso (Jahantigh et al., 2019; Whaiduzzaman et al., 2022; Leal-Sobral et al., 2023; Tekinerdogan et al., 2023).
Gestión de grandes volúmenes de datos	Utilizar plataformas de almacenamiento y procesamiento en la nube que puedan manejar el volumen de datos generado por los dispositivos IoT. Considerar también el uso de técnicas de compresión y agregación de datos.
Procesamiento en el borde (Edge Computing)	Implementar procesamiento en el borde para reducir la latencia en aplicaciones que requieren respuestas en tiempo real.
Análisis de datos en tiempo real	Utilizar herramientas de análisis de datos en tiempo real para generar información útil y tomar decisiones informadas basadas en los datos recopilados.
Monitorización y gestión centralizada	Implementar un sistema de monitorización y gestión centralizada que permita supervisar y controlar todos los componentes del sistema.
Flexibilidad y adaptabilidad	Diseñar sistemas que puedan adaptarse a las necesidades cambiantes de la ciudad y a las nuevas tecnologías.
Uso de plataformas y servicios en la nube	Aprovechar las ventajas de las plataformas y servicios ofrecidos por proveedores de computación en la nube (AWS, Google Cloud, Azure) para reducir costos y acelerar el desarrollo de aplicaciones IoT (Leal-Sobral et al., 2023).
Adopción de una arquitectura de referencia	Seguir una arquitectura de referencia que sirva como guía para el diseño de la integración (Jahantigh et al., 2019; Fahmideh & Zowghi, 2020).

Lo mostrado proporciona una visión general de los estudios existentes, pero es importante recordar que el campo de la integración de IoT y Cloud Computing en ciudades inteligentes es dinámico, por lo que es fundamental mantenerse actualizado en cuanto a tendencias y desarrollo.

La investigación resalta la importancia de la integración de IoT (Internet de las Cosas), la computación en la nube, la computación en el borde y la computación en niebla para el desarrollo de ciudades inteligentes, se observa que la IoT es fundamental para la adquisición de datos, siendo estos necesarios para que otras tecnologías funcionen de manera óptima, la arquitectura de las ciudades inteligentes se basa en la recopilación y análisis de datos de dispositivos IoT, que se utilizan para mejorar la eficiencia y la calidad de los servicios públicos, los datos pueden provenir de diversos sensores instalados en edificios, carreteras, parques, sistemas de transporte y otros puntos de la ciudad, la computación en la nube sirve como un centro de datos urbano para procesar y almacenar los datos generados por los dispositivos IoT.

Comparación con la literatura existente: La literatura existente destaca la necesidad de marcos integradores para ciudades inteligentes, que abarcan componentes como la vida inteligente, la economía inteligente, la gobernanza inteligente, la gente inteligente, el medio ambiente inteligente y la movilidad inteligente, varios estudios han identificado los componentes clave de las arquitecturas de las ciudades inteligentes basadas en IoT, incluidos los niveles de percepción, red y aplicación, la literatura también aborda temas como la seguridad, la privacidad y la gestión de la energía en las ciudades inteligentes, por otro lado, se están realizando investigaciones sobre cómo hacer que los servicios en la nube sean escalables debido al rápido aumento de dispositivos IoT, y la computación en la niebla se ha vuelto esencial para proporcionar servicios más cerca de los sistemas finales y se han identificado protocolos como MQTT y RESTful HTTP como buenas opciones para la comunicación en diferentes segmentos del sistema.

Implicaciones para el desarrollo de ciudades inteligentes: La integración de la IoT, la computación en la nube, la computación en el borde y la computación en niebla permite la creación de aplicaciones y servicios inteligentes que pueden mejorar la vida de los ciudadanos, estos servicios incluyen sistemas de transporte inteligentes, gestión inteligente de residuos, sistemas de iluminación inteligentes, salud inteligente, etc. Al analizar grandes cantidades de datos, las ciudades inteligentes pueden tomar decisiones más informadas y optimizar la asignación de recursos, el uso de nudges basados en datos puede ser una forma efectiva de promover cambios de comportamiento para lograr objetivos de sostenibilidad, los modelos de ciudades inteligentes pueden promover el desarrollo sostenible y mejorar la calidad de vida de los habitantes de la ciudad.

Limitaciones del estudio: La falta de un enfoque sistemático para la selección de artículos y la consideración de artículos publicados recientemente puede ser una limitación, la mayoría de las investigaciones se han centrado en los aspectos técnicos de las ciudades inteligentes y existe una falta de investigación en el impacto de las ciudades inteligentes en el sur global, los estudios pueden no abordar adecuadamente las cuestiones éticas y de derechos de los ciudadanos que plantean las ciudades inteligentes, además, algunos estudios se basan únicamente en métodos cualitativos y carecen de datos cuantitativos, por otro lado, la subjetividad en la evaluación de arquitecturas puede ser una limitación, la falta de información contextual en la que se han acomodado las arquitecturas también es un problema.

## CONCLUSIONES

La integración de IoT, computación en la nube, computación en el borde y computación en niebla es esencial para el desarrollo de ciudades inteligentes, ya que mejoran la eficiencia, la sostenibilidad y la calidad de vida, los datos recopilados a través de dispositivos IoT se utilizan para diversos servicios como la gestión de la energía, la salud, el transporte y la gestión de residuos, existe una necesidad de más investigación sobre los impactos de las ciudades inteligentes en el sur global, así como para abordar las cuestiones éticas y de derechos de los ciudadanos.

Relación con los objetivos planteados: El objetivo general de los estudios sobre ciudades inteligentes es mejorar la vida de los ciudadanos mediante la implementación de soluciones basadas en la tecnología, la integración de diferentes tecnologías como IoT, la computación en la nube y la inteligencia artificial permite a las ciudades ser más inteligentes, eficientes y sostenibles, sin embargo, es necesario abordar las limitaciones existentes, especialmente en el ámbito del sur global, para asegurar una implementación justa y equitativa de estas tecnologías.

Recomendaciones para futuras investigaciones e implementaciones prácticas: Se necesitan investigaciones adicionales para explorar el impacto de las ciudades inteligentes en el sur global para abordar las cuestiones éticas y de derechos de los ciudadanos, es necesario el desarrollo de estándares para la implementación de ciudades inteligentes, con especial atención en la seguridad de los datos y la protección de la privacidad, es vital que más estudios utilicen un enfoque mixto, incluyendo tanto análisis cuantitativos como cualitativos, ya que, al diseñar ciudades inteligentes, se deben tener en cuenta los valores éticos, así como la equidad y la inclusión, además, se debe dar prioridad a la transparencia en el uso de los datos recogidos, y se debe permitir que los ciudadanos participen en las decisiones sobre los modelos de ciudades inteligentes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, S. F., Shuravi, S., Afrin, S., Rafa, S. J., Hoque, M., & Gandomi, A. H. (2023). The Power of Internet of Things (IoT): Connecting the Dots with Cloud, Edge, and Fog Computing. *arXiv.org*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.03420>
- Alam, T. (2021). Cloud-Based IoT Applications and Their Roles in Smart Cities. *Smart Cities*, 4(3), 1196–1219. <https://doi.org/10.3390/smartcities4030064>
- Dadwal, S. S. (2023). IoT (Internet of Things), Cloud Computing and the Elementary Building Blocks of Smart Sustainable Cities. En, S. Dadwal, H. Jahankhani, G. Bowen, & I. Nawaz, *Technology and Talent Strategies for Sustainable Smart Cities*. (pp. 1-33). Emerald Publishing Limited, Leeds.
- Dange, K. M. (2023). A comprehensive review on IoT based smart cities. *Sustainable Engineering and Innovation*, 5(1), 48-57. <https://www.doi.org/10.37868/sei.v5i1.id188>
- Fahmideh, M., & Zowghi, D. (2020). IoT Smart City Architectures: An Analytical Evaluation. (Ponencia). *9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. Vancouver, Canada.
- Feng, H., Tao, C., & Yan, J. (2019). Application of Cloud Computing and Internet of Things in the Construction of Smart City. (Ponencia). *International Seminar on Automation, Intelligence, Computing, and Networking (ISAICN 2019)*. Ningbo, China.
- Gunawan, Shabrina, W., & Andriani, W. (2022). Systematic Literature Review Implementation of the Internet of Things (IoT). *Buana Information Technology and Computer Sciences (BIT and CS)*, 3(2). <https://doi.org/10.36805/bit-cs.v3i2.2762>
- Jahantigh, M. N., Rahmani, A. M., Navimirour, N. J., & Rezaee, A. (2019). Integration of Internet of Things and cloud computing: a systematic survey. *IET Communications*, 14(21), 3944-3944. <https://doi.org/10.1049/iet-com.2019.0537>
- Khan, S., Wani, M. M., & Alam, M. (2020). IoT Applications in Urban Sustainability. *arXiv: Other Computer Science*. <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2008.10656>
- Kuchuk, H., & Malokhvii, E. (2024). Integration of iot with cloud, fog, and edge computing: a review. *Advanced Information Systems*, 8(2), 65–78. <https://www.doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.08>
- Leal-Sobral, V. A., Nelson, J., Asmare, L., Mahmood, A., Mitchell, G., Tenkorang, K., Todd, C., Campbell, B., & Goodall, J. L. (2023). A Cloud-Based Data Storage and Visualization Tool for Smart City IoT: Flood Warning as an Example Application. *Smart Cities*, 6(3), 1416-1434. <https://www.doi.org/10.3390/smartcities6030068>
- Mahmood, O. A., Abdellah, A. R., Muthanna, A., & Koucheryavy, A. (2022). Distributed Edge Computing for Resource Allocation in Smart Cities Based on the IoT. *Information*, 13(7). <https://www.doi.org/10.3390/info13070328>
- Pamudji, A. K. (2023). IoT-driven Environmental Support System for Smart Cities. *SISFORMA*, 10(1). <https://www.doi.org/10.24167/sisforma.v10i1.10209>
- Shenkoya, T. (2023). Sustainable Urban development: An evaluation of the impact of IoT on sustainable development and energy management in SMART cities. *PREPRINT (Version 1) available at Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1962624/v1>
- Su, P., Chen, Y., & Lu, M. (2022). Smart city information processing under internet of things and cloud computing. *The Journal of Supercomputing*, 78, 3676–3695. <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03972-5>
- Tekinerdogan, B., Köksal, Ö., & Celik, T. (2023). System Architecture Design of IoT-Based Smart Cities. *Applied Sciences*, 13(7), 4173. <https://doi.org/https://www.doi.org/10.3390/app13074173>
- Whaiduzzaman, M., Barros, A., Chanda, M., Barman, S., Sultana, T., Rahman, S., Roy, S., & Fidge, C. (2022). A Review of Emerging Technologies for IoT-Based Smart Cities. *Sensors*, 22(23), 9271. <https://www.doi.org/10.3390/s22239271>