



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INTERNET DE LAS COSAS

PROYECTO TERMINAL
SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO
REAL IOT DE CULTIVOS CELULARES

Para obtener el grado de
Maestro en Internet de las Cosas

PRESENTA

Ignacio Pineda del Aguila
Director

Mtro. Melecio Sánchez Ruiz
Codirector

Dr. José Antonio Alvarado Moreno
Comité tutorial

Dra. Silvia Soledad Moreno Gutierréz
Dr. Ismael Domínguez Jiménez
Dr. Pablo Octavio Aguilar
Mtro. Melecio Sánchez Ruíz

Mineral de la Reforma, Hgo., a 5 de junio de 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Área Académica de Computación y Electrónica

Mineral de la Reforma, Hgo., a 5 de junio de 2026

No. De Control: ICBI-AACyE/724/2026

Asunto: Autorización de impresión

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

El Comité Tutorial del **PROYECTO TERMINAL** del programa educativo de posgrado titulado **"SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL IOT DE CULTIVOS CELULARES"**, realizado por el sustentante **IGNACIO PINEDA DEL AGUILA** con número de cuenta **477778** perteneciente al programa de **MAESTRÍA EN INTERNET DE LAS COSAS**, una vez que se ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

El Comité Tutorial

Dra. Silvia Soledad Moreno Gutiérrez
Miembro del comité

Dr. Ismael Domínguez Jiménez
Miembro del comité

Dr. Pablo Octavio Aguilar
Miembro del comité

Mtro. Melecio Sánchez Ruíz
Miembro del comité



ÁREA ACADÉMICA DE
COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA

C.c.p. Archivo
MSR

"Amor, Orden y Progreso"



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40052, 40053
aacye_icbi@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

DEDICATORIA

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por brindarme los conocimientos necesarios para mi formación profesional. A mis asesores y sinodales de este Proyecto Terminal, cuya guía, exigencia y consejos fueron fundamentales para culminar con éxito este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a todos los docentes que formaron parte de mi trayectoria en el posgrado por compartir su conocimiento con vocación. Por el apoyo en las jornadas de trabajo y por hacer del proceso de este Proyecto Terminal una experiencia de crecimiento compartido.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
GLOSARIO	xii
Resumen	1
Capítulo I.	3
Introducción.....	3
Base Tecnológica y Evolución Histórica	4
Contexto Histórico de la Observación	5
Instrumentos de observación básicos.....	5
Instrumentos de Observación Avanzados	5
Restricciones:	6
Objetivo y relevancia.....	7
Impacto potencial	7
Planteamiento del problema	8
Descripción del objeto de estudio	9
Descripción del Problema	9
Delimitación de la Investigación.....	10
Pregunta General y Específicas.....	12
Justificación del estudio	12
Viabilidad de la Investigación	13
Sustento Metodológico	13
Alcances y Limitaciones	14
Originalidad	14

Impacto.....	15
Capítulo II. Estado Del Arte.....	16
Monitoreo Convencional.....	16
Paradigma IOT y Monitoreo.....	17
Tendencias y Uso de Nuevas Técnicas.....	18
Capítulo III. Marco Teórico.....	20
El Endotelio.....	20
Células Formadoras de Colonias Endoteliales.....	22
Principales Pasos en la Formación de CFCE.....	22
Disfunción Endotelial y COVID-19.....	23
Monitoreo Remoto de CFCE.....	24
Internet de las Cosas Médicas.....	25
Laboratorios Remotos.....	25
Sistemas de Monitoreo Remoto.....	26
Ubidots®: Plataforma Comercial IOT.....	27
Protocolos de Comunicación en IOT.....	28
Instrumentos de Observación Avanzados.....	30
Restricciones:.....	30
Usabilidad e Instrumentos para Evaluación.....	31
Capítulo IV. Marco Metodológico.....	33
Diseño de la Solución.....	33
Componentes:.....	33
Arquitectura Básica De IOT.....	37
Proceso de Monitoreo de CFCE.....	38
Flujo de Datos Sistema IOT.....	39
Diagrama de Secuencia UML.....	40
Panel de Control o Dashboard en Ubidots®.....	41
Evidencia gráfica del panel de control en Ubidots®.....	42
Entorno y condiciones de prueba.....	43

Solución IOT Propuesta	43
Arquitectura de la Solución IOT	44
Interconexiones	45
Funcionalidades Detalladas	45
Interconexión de prototipo de monitoreo remoto	45
Evaluación de Usabilidad	46
Captura de datos:	48
Transmisión a UBIDOTS:	48
Flujo de datos	48
Métricas de Evaluación	49
Escenario:	50
Resultados Esperados	51
Capítulo V. Desarrollo de Proyecto	52
Capítulo VI. Resultados	55
Análisis de resultados	55
Siguientes pasos	60
Desafíos	60
Capítulo VII. Conclusiones y Recomendaciones	61
Anexos.	62
Anexo 1. Instrumento de Evaluación de Usabilidad (SUS)	62
Anexo 2. Código Fuente Sistema Embebido Sistema IOT	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura de Sistema para Monitoreo Remoto. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 2 Funciones Principales del Sistema IOT. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 3 Flujo de Datos del Sistema IOT. Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 4. Diagrama de Secuencia UML. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 5. Sistema Web IOT Ubidots. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 6. Plataforma Web IOT Ubidots. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 7. Esquema General de Interconexión de componentes Sistema IOT.....	46
Figura 8. Pruebas de UX/UI en etapas tempranas de desarrollo. Usuario 1.....	47
Figura 9. Pruebas de UX/UI en etapas tempranas de desarrollo. Usuario 2.....	47
Figura 10. Métricas de Evaluación. Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 11. Validación de Sistema IOT en entorno controlado de Laboratorio.....	50
Figura 12. Diseño de Interfaz de Usuario HMI. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 13. Implementación de Interfaz de Usuario HMI + ESP32-S3. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 14. Dashboard IOT en la nube UBIDOTS. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 15. Repositorio de datos e imágenes en SD ESP32-S3. Fuente: Elaboración propia.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Componentes utilizados en el proyecto	36
---	----

GLOSARIO

Aterogénesis, 3

Proceso mediante el cual se forman placas de ateroma en las paredes internas de las arterias (Ferreira & Júnior, 2023).

CFCE

Células formadoras de colonias endoteliales (Liu et al., 2024), 3

DHT11

Sensor genérico de variables medioambientales (Hernández et al., 2022), 19

Edge computing, 5

Procesamiento y almacenamiento cerca de la fuente de datos (Modupe et al., 2024), 2

ESP32-S3

SoC, *System on Chip* de bajo consumo; placa de desarrollo (Millar et al., 2024), 4

Hemostasia

Es el proceso fisiológico que permite al cuerpo detener el sangrado cuando hay una lesión vascular (Moraleda et al., 2021), 3

IOMT

Internet of Medical Things, IOMT por sus siglas en inglés, 27

IOT

Internet of Things, Internet de las Cosas, xiv

OV3660

Modelo módulo sensor óptico, 39

SUS

System Usability Scale, por sus siglas en inglés, 37

Time-lapse

Un time-lapse es una técnica cinematográfica o fotográfica que comprime el tiempo, mostrando procesos lentos como si ocurrieran rápidamente. Se logra grabando una serie de imágenes a intervalos regulares y luego reproduciéndolas a una velocidad normal, creando la ilusión de que el tiempo ha pasado más rápido., 1

TRL

Grado de Madurez Tecnológica, TRL por sus siglas en inglés, 11

Trombosis

Es la formación de un coágulo de sangre (trombo) dentro de un vaso sanguíneo, ya sea una vena o una arteria, que puede impedir o reducir el flujo sanguíneo normal., 3

Ubidots

Plataforma IOT pública, 4

Resumen

El Internet de las Cosas (IOT) tiene potencial de aplicación en distintos ámbitos de la vida humana, entre ellos, la vigilancia y monitoreo de distinta índole. El objetivo de este trabajo fue la validación conceptual de un Sistema IOT de Monitoreo time-lapse en tiempo real de cultivos celulares. El proyecto se sustenta en un marco teórico y metodológico que justifica la integración de sensores y computación en la nube para la supervisión biomédica en tiempo real. Se detalla el diseño y desarrollo integral del sistema, abarcando la arquitectura de hardware para la captura de variables del medioambiente, los protocolos de comunicación y la interfaz de visualización de datos. Para evaluar la experiencia de usuario, se realizó una medición de usabilidad mediante el Sistema de Escala de Usabilidad (SUS, por sus siglas en inglés). Los resultados obtenidos validan la factibilidad técnica de la plataforma IoT, demostrando una alta aceptación operativa y una interacción intuitiva. Este desarrollo aporta una solución tecnológica viable y escalable para la automatización de procesos en biotecnología.

Palabras clave: Internet de las cosas, monitoreo remoto, cultivos celulares, escala SUS, usabilidad

Abstract

The internet of Things (IoT) possesses significant application across various domains of human activity, including diverse surveillance and monitoring operations. The objective of this study was the proof-of-concept validation of a real-time, time-lapse IoT monitoring systema for cell cultures. The project is grounded in a theoretical and methodological framework that justifies the integration of sensors and cloud computing for real-time biomedical supervision. Furthermore, the comprehensive design and development of the system is detailed, encompassing the hardware architecture for environment variable acquisition, communication protocols, and the data visualization interface. To evaluate user experience, usability was assessed using the System Usability Scale (SUS). The obtained results validate the technical feasibility of the IoT platform, demonstrating high operational acceptance and and intuitive user interaction. This development provides a viable and scalable technological solution for automation in biotechnology.

Keywords: Internet of Things, remote monitoring, cell cultures, SUS scale, usability.

Capítulo I.

Introducción

La investigación en trombosis, hemostasia y aterogénesis depende del estudio del comportamiento celular bajo condiciones controladas. En particular, las células endoteliales – actores clave en la fisiopatología vascular— ya que exhiben respuestas dinámicas ante estímulos bioquímicos y mecánicos, cuya caracterización requiere observación continua in situ (Dessalles et al., 2021, p. 873; Fang et al., 2019).

La monitorización remota en tiempo real de estos cultivos celulares incluidas las Células Formadoras de Colonias Endoteliales (CFCE), facilitada por sistemas IOT, permite a los investigadores biomédicos supervisar el desarrollo de los ensayos de forma continua y eficiente, minimizando la intervención manual y los errores asociados (Gowder, 2017, p. 148).

Tradicionalmente, este monitoreo enfrenta un dilema fundamental: la necesidad de mantener parámetros ambientales estables (37°C, 95% HR, 5% CO²) dentro de incubadoras, mientras se capturan datos morfológicos y ambientales sin perturbaciones (Talebipour et al., 2024, p. 8; Wrzesinski et al., 2021).

Los instrumentos disponibles para esta tarea se clasifican en dos categorías con limitaciones:

1. Sistemas básicos (microscopía manual, sensores lógicos), que comprometen la integridad experimental al requerir apertura repetida de incubadoras.

2. Sistemas avanzados (videomicroscopía time-lapse comercial), con costos prohibitivos (Çetin, 2023; Jana et al., 2025, p. 281) y rigidez operativa que limita su escalabilidad.

Existe una brecha tecnológica: la ausencia de soluciones accesibles que integren captura de imágenes, mediciones ambientales y transmisión remota en tiempo real, adaptables a incubadoras estándar en uso y actualmente en operación en laboratorios de investigación biomédica.

Este proyecto propone una solución mediante el Internet de las Cosas (IOT), aprovechando componentes de bajo costo como el sistema embebido ESP32 de la empresa Espressif, sensores digitales y plataformas Cloud como Ubidots® (ESP32-S3, sensores digitales).

La solución propuesta tiene las siguientes ventajas: optimización del monitoreo de cultivos celulares en tiempo real, registro de datos para trazabilidad, minimización de la manipulación de cultivos para reducir el riesgo de contaminación, y acceso remoto a los datos en cualquier momento y lugar, lo que mejora la eficiencia y la seguridad de las investigaciones (Pérez et al., 2017; Rovira et al., 2025).

Base Tecnológica y Evolución Histórica

La evolución del monitoreo celular se resume en esta línea de tiempo:

Era predigital (1950-1989): Registros manuales sujetos a error humano (Lam, 2020; Wacogne et al., 2022, p. 557).

Era digital temprana: Introducción de sistemas de captura de imágenes semiautomatizados que aún requerían intervención física para la extracción de datos.

Era del IOT: Integración de sensores y conectividad inalámbrica, permitiendo el monitoreo continuo y remoto de múltiples parámetros sin comprometer la esterilidad o la estabilidad del microambiente celular (Duru et al., 2024). Esta transición de métodos manuales a la implementación de sistemas IOT ha permitido una evaluación más precisa de la viabilidad, densidad y confluencia celular, parámetros críticos en la investigación biomédica y el desarrollo de fármacos (Avci et al., 2025).

Automatización parcial (1990-2010): Cámaras CCD y software básico (e.g., ImageJ), aún dependientes de intervención física (Grishagin, 2014; Sage et al., 2005).

Desde 2020 hasta la fecha, IOT biomédico: Microcontroladores (e.g., ESP32) democratizan el acceso, lo que permite integración de sensores, Edge Computing y transmisión en la nube (Ficili et al., 2025; Saha, 2025).

Contexto Histórico de la Observación

Instrumentos de observación básicos

El microscopio óptico invertido se utiliza para observar células en cultivo desde abajo, ideal para cajas de Petri o frascos de cultivo; es relativamente asequible y de tamaño manejable pero requiere de intervención humana para la observación continua.

Cámaras digitales acopladas a microscopios: Cámaras básicas que pueden tomar imágenes o videos, pero sin automatización.

Termómetros/higrómetros analógicos: Monitorean la temperatura/humedad, pero sin registro continuo.

Instrumentos de Observación Avanzados

Microscopios de fluorescencia: Permiten observar células marcadas con fluorocromos. Son más costosos y requieren de equipamiento adicional.

Sistemas de video microscopía time-lapse automatizados (Sprenger et al., 2012): Equipos especializados que permiten capturar imágenes a intervalos regulares durante largos periodos. Son de costos elevados, voluminosos.

Incubadoras inteligentes con sensores integrados: Control ambiental preciso, pero a menudo sin capacidad de imagenología celular in situ (Talebipour et al., 2024, p. 2).

Citómetros de flujo: Para análisis celular rápido, pero a menudo no son adecuados para monitoreo continuo en incubadoras en tiempo real (Guez et al., 2023, p. 2).

En este contexto y como resultado, se puede sintetizar el paradigma de la Cuarta Revolución Industrial (4IR), en la que los avances tecnológicos sin precedentes impactan todos los sectores de actividad humana; incluida la salud, la cual se caracteriza por la intersección de innovaciones digitales, biológicas, y físicas, en gran parte, gracias a la miniaturización de chips y sensores, la democratización del acceso a la información, el acceso a software y hardware abiertos, la inteligencia artificial, y que benefician a los sistemas de salud y la forma en que se desarrolla e innova en investigación biomédica, y servicios de salud (Castro & Araújo, 2020, p. 92; Park, 2016; Vargas-Elizondo, 2020).

Restricciones:

Tamaño: Los equipos avanzados suelen ser voluminosos y no caben en una incubadora estándar (Çetin, 2023, p. 2; Talebipour et al., 2024).

Costo: Los sistemas automatizados de video microscopía pueden costar decenas de miles de dólares, incompatibilidad con incubadoras estándar y la imposibilidad de integración IOT.

Los Sistemas de Monitoreo Remoto (SMR) son reconocidos como tecnología emergente; y para fines de este proyecto integrador, se utilizarán sensores y dispositivos

usables para la recolección de datos, así como canales de comunicación que permitan la configuración de tecnologías y protocolos de comunicación inalámbrica para el intercambio de datos, su almacenamiento, proceso y obtención de nueva información (Peyroteo et al., 2021).

Objetivo y relevancia

El presente trabajo tiene como objetivo principal validar un prototipo de sistema IOT para el monitoreo de cultivos celulares, y se enfoca en la evaluación de su funcionalidad, la verificación de la adquisición de datos y la usabilidad percibida por los usuarios finales en un entorno de laboratorio.

Relevancia:

- Más allá de la herramienta, el beneficio para la ciencia radica en facilitar:
- Estudios longitudinales sobre la dinámica celular
- Autonomía tecnológica de bajo costo
- Establecimiento de un marco replicable para la vigilancia de procesos biomédicos en entornos controlados.
- Verificar estabilidad operativa en condiciones simuladas de incubadora
- Cuantificar precisión sensorial y fiabilidad en la adquisición de datos.
- Evaluar la utilidad biológica de las imágenes capturadas para análisis celular

Con los hallazgos se sentarán las bases para futuras iteraciones orientadas a aplicaciones *in vivo*.

Impacto potencial

Al superar las barreras de costo y complejidad inherentes a las soluciones convencionales, el presente sistema representa una oportunidad significativa para extender los

estudios sobre el comportamiento celular in vitro en diversas patologías, particularmente en instituciones con restricciones presupuestarias, lo que facilita el acceso equitativo a la investigación biomédica. Adicionalmente, establece un precedente para la integración del IOT en el biomonitoreo, en concordancia con las iniciativas y tendencias globales hacia una ciencia abierta y accesible.

Planteamiento del problema

La observación del comportamiento de cultivos celulares se realiza habitualmente mediante instrumentos ópticos como microscopios convencionales mecánicos y computarizados, los cuales permiten una observación eficiente de células provenientes de diversos tejidos (Ceccherini-Nelli & Matteoli, 2012; Geraghty et al., 2014). Sin embargo, estos dispositivos exhiben un volumen y peso considerables que los hacen inadecuados para su empleo in situ en cámaras o incubadoras, entornos habituales en los laboratorios para tales fines.

Adicionalmente, la adquisición de equipo especializado para tareas específicas, como el monitoreo utilizado en este estudio para validar el prototipo, implica costos elevados que pueden constituir un gasto desproporcionado (Baker, 2010; Beddingfield et al., 2009), no menos relevante resulta la intervención humana directa requerida para el registro de imágenes y la obtención de datos sobre temperatura y humedad en momentos puntuales en las CFCE (Çetin, 2023; Klein et al., 2022).

En la Unidad de Investigación en Hemostasia, Aterogénesis y Trombosis del Hospital General Regional No. 1 «Dr. Carlos MacGregor Sánchez Navarro» del Instituto Mexicano del Seguro Social, el monitoreo de cultivos celulares se lleva a cabo mediante la extracción manual de las placas de cultivo de la incubadora para su observación microscópica, lo cual genera fluctuaciones térmicas y lumínicas que pueden comprometer la fisiología celular.

Se reconoce la necesidad de un sistema que habilite el monitoreo no invasivo y en tiempo real en el entorno controlado de la incubadora, con el propósito de preservar la integridad experimental, minimizar la variabilidad de los resultados, optimizar los recursos disponibles y reducir la carga laboral del personal.

Descripción del objeto de estudio

Un modelo para el monitoreo como el de las CFCE o cualquier otro tipo de cultivos celulares en ambientes controlados de temperatura, humedad, CO₂ y estímulos específicos como citocinas o factores de crecimiento representa un reto y para su estudio como tal, debe partir del diseño y desarrollo inicial. Evaluar y mejorar un modelo de monitoreo bajo el paradigma del IOT deberá mejorarse continuamente en un ciclo de mejora continua hasta que el dispositivo o modelo de monitoreo satisfaga las necesidades particulares del usuario. Esta optimización incluye la validación de la precisión de los sensores y la usabilidad del sistema por parte del personal de laboratorio.

Descripción del Problema

Particularmente, en el caso de las CFCE, la observación se hace sacando el cultivo de la incubadora y llevándolo al microscopio. Si se quisiera observar los cultivos dentro de la incubadora, se requeriría entonces de un equipo costoso, voluminoso y no fácilmente miniaturizable (Çetin, 2023; Talebipour et al., 2024, p. 281), lo que dificulta la observación de los procesos de interés en entornos controlados de temperatura, pH y luz habitual.

El estudio del comportamiento de las CFCE ante diferentes estímulos como en este caso, ante la presencia de plasma de pacientes recuperados de COVID-19, el cual contiene diferentes citocinas inflamatorias y factores de crecimiento que podrían modificar el comportamiento in vitro de las células está en proceso. Por lo que esta propuesta podría apoyar

la relevancia del estudio en un futuro sin necesidad de sacar los cultivos de la incubadora y continuar con el monitoreo.

Lo anterior sugiere la necesidad de alternativas tecnológicas de bajo costo y para fines específicos de monitoreo como parte del desarrollo tecnológico del país.

Esta iniciativa se alinea con la tendencia global hacia la democratización del acceso a tecnologías avanzadas, permitiendo que instituciones con recursos limitados puedan realizar investigaciones de vanguardia en cultivos celulares.

Delimitación de la Investigación

El alcance del presente trabajo se refiere únicamente a la implementación de un modelo y prueba de concepto de un prototipo de monitoreo remoto y censado de datos bajo el paradigma del IOT. Esto significa que se investigará sobre los principios básicos de la electrónica para sustentar el circuito que hará posible el monitoreo de colonias celulares, diseño funcional y prototipado a bajo nivel de la interfaz de usuario y su programación, así como la medición de usabilidad en etapas tempranas del desarrollo del sistema a través de instrumentos validados.

De esta manera, se proporcionará una plataforma para la recopilación continua de datos ambientales y de imagen, permitiendo un análisis detallado de la viabilidad y el crecimiento celular sin la necesidad de manipulación física. Este enfoque no solo preserva la homeostasis del cultivo, sino que también genera conjuntos de datos temporales ricos, fundamentales para la comprensión de las dinámicas celulares complejas.

Por tanto y de acuerdo con la escala TRL (*Technology Readiness Level*, por sus siglas en inglés) (Mankins, 1995), en la cual se establece los niveles TRL1 hasta el TRL9, y para la toma de decisiones oportunas para gestión de riesgos como para temas de financiación y transición tecnológica, este estudio pretende abarcar de TRL1 a TRL3.

Pregunta General y Específicas

A partir de la problemática y justificación expuestas, se formula la siguiente pregunta de investigación general: ¿Es factible la validación de un sistema IOT prototipo para el monitoreo no invasivo y en tiempo real de cultivos celulares en ambientes controlados, considerando su precisión en la adquisición de datos y su usabilidad por parte del personal de laboratorio?

Esta pregunta busca determinar la viabilidad de implementar una solución tecnológica que aborde las limitaciones actuales en la observación de cultivos celulares, proponiendo un sistema que integre la Internet de las Cosas para optimizar tanto la metodología científica como la eficiencia operativa en entornos de laboratorio.

Justificación del estudio

Magnitud, la vigilancia del comportamiento de CC y CFCE, como ya se ha mencionado, tiene un impacto en cuanto al descubrimiento y potencial uso de vías de expresión para diseñar o mejorar tratamientos biomédicos con amplio impacto en los sistemas de salud y en las personas con enfermedades crónicas y cardíacas.

Viabilidad: Con los avances tecnológicos referentes a la miniaturización de componentes electrónicos, su bajo costo y su accesibilidad, es viable construir prototipos funcionales para solucionar problemas específicos, como el que se propone en este trabajo.

Factibilidad: Es factible realizar el prototipo funcional puesto que se cuenta con infraestructura y, sobre todo, con la experiencia de científicos dedicados al tema en cuestión para la correcta guía para el logro de los objetivos declarados.

Trascendencia: El potencial impacto de contribuir a la generación de conocimiento respecto al monitoreo remoto de colonias celulares mediado por el paradigma del IOT es

crucial, dado que es una aplicación de conocimiento y técnicas recientes para agregar luz a las investigaciones científicas en el tema.

En seguimiento a la escala TRL

El **Nivel 1**. Corresponde a la investigación básica y formulación de concepto; para ello, se analizó la viabilidad teórica del sistema, se identificaron y analizaron los componentes (sensores, parámetros a medir), las tecnologías de comunicación pertinentes (Wi-Fi) y la arquitectura básica (elección de plataforma de almacenamiento y procesamiento en la nube).

Nivel 2. Se realizó el prototipado de subsistemas aislados de los sensores, circuitos de adquisición de datos, y los módulos de comunicación. Se calibraron sensores y se revisa funcionamiento individual.

Nivel 3. Integración básica, se integran sensores, microcontrolador, comunicación y software básico. Se prueba en un entorno semi-real la adquisición de datos y la operación en un periodo corto de todo el sistema.

Viabilidad de la Investigación

Es viable el desarrollo y validación del prototipo funcional para la vigilancia de CC y CFCE mediante el IOT dado que se cuenta con el asesoramiento del proyecto por un investigador con amplia experiencia y línea de investigación sobre el tema. Además, la disponibilidad de herramientas de desarrollo de hardware y software de código abierto facilita la iteración y mejora del prototipo con costos reducidos (Drotth & Alatia, 2016).

Sustento Metodológico

La relevancia biológica radica en la evaluación cuantitativa del impacto de la actividad celular objetivo sobre la proliferación, viabilidad y capacidad de formación de colonias celulares.

En el marco de esta validación de concepto, se selecciona sensores miniaturizados calibrados conforme a dispositivos estandarizados, junto con sensores ópticos de bajo costo, con el propósito de facilitar el refinamiento del modelo en etapas posteriores.

Asimismo, se prevé el monitoreo en tiempo real mediante la implementación de una arquitectura IOT, en la que los nodos sensores son calibrados y controlados a través de un microcontrolador, se establece la conectividad inalámbrica y se procesan los datos para su transmisión a un Gateway local y, posteriormente, a la nube.

De forma análoga, se simula la implementación de la arquitectura en una plataforma en la nube, junto con la elaboración de un panel de control en Ubidots® para la visualización en tiempo real de los rangos ideales y/o reales suministrados por los sensores.

Alcances y Limitaciones

El alcance de esta investigación se delimita a la implementación de un prototipo funcional orientado a la vigilancia remota de cultivos celulares, la adquisición de datos ambientales, el desarrollo de una interfaz de usuario para la interacción hombre-máquina y la creación de un panel de control asociado al prototipo propuesto.

Una de las limitaciones radica en que el estudio se fundamenta en investigaciones preliminares, caracterizadas por la escasez de referencias sobre la aplicación del IOT a esta problemática en el contexto mexicano.

Originalidad

La literatura científica revela una escasa información sobre estrategias análogas implementadas en México (Dios et al., 2026; Negrete, 2018). Esta limitación pone de manifiesto la innovación inherente a la aplicación de tecnologías IOT de bajo costo en el

monitoreo de cultivos celulares, un ámbito con elevado potencial de escalabilidad en diversos entornos de investigación

La implementación de soluciones de bajo costo y robustas, como la propuesta, puede expandir su aplicabilidad más allá de los biobancos, abarcando cualquier escenario que requiera monitoreo ambiental continuo sin intervención humana directa (Luna-González et al., 2020). Este enfoque democratiza el acceso a tecnología avanzada para la investigación, permitiendo a laboratorios con recursos limitados optimizar sus procesos de monitoreo.

Impacto

El impacto potencial del monitoreo de CC y CFCE radica en la identificación y comprensión del comportamiento de estas, lo que podría tener repercusiones en evaluaciones de respuestas celulares a estímulos biológicos. Esto subraya la trascendencia de validar un prototipo IOT que no solo optimice la recopilación de datos, sino que también asegure la integridad y fiabilidad de la información crítica para la investigación biomédica.

Capítulo II. Estado Del Arte

Monitoreo Convencional

Una de las tendencias en cuanto al monitoreo de las CFCE es por imágenes de bioluminiscencia, que se logra al infectar colonias de CFCE con Lentivirus que son vectores de una proteína fluorescente verde mejorada (eGFP) y un gen indicador de doble fusión de Luciferasa de luciérnaga (Luc2). Posteriormente se hace un seguimiento y análisis de las imágenes que se obtienen por bioluminiscencia (Ding et al., 2015) que permite ver procesos de replicación en tiempo real, así como evaluar tasas de división, alteraciones al ciclo celular. Este método ofrece una perspectiva dinámica sobre la cinética celular, aunque su implementación requiere equipamiento especializado y reactivos costosos.

Otro estudio relacionado al seguimiento o monitoreo del comportamiento de CFCE, es a través de sistemas ópticos para el monitoreo. Este método se usa con ImageJ, que es un programa de procesamiento digital de imagen de dominio público desarrollado por la agencia NIH (*National Institutes of Health*, por sus siglas en inglés) y cuyo código en Matlab permitió el análisis de un video de 2 minutos a 70 cuadros por segundo (Seeto & Lipke, 2016).

El monitoreo de cultivos celulares y células progenitoras requiere de precisión en parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, O₂, CO₂) y biológicos (morfología, proliferación, diferenciación). La capacidad de estas plataformas para integrar análisis continuos y automáticos de variables como la morfología y viabilidad celular, por ejemplo, en la detección de células senescentes o en la discriminación de células diferenciadas mediante el uso de algoritmos de segmentación y modelado estadístico de formas, representa un avance significativo para la optimización de los procesos de cultivo (Grigoryeva, 2020, p. 237).

Paradigma IOT y Monitoreo

El Internet de las Cosas (IOT) integra sensores, redes inalámbricas y análisis de datos para automatizar la vigilancia, reducir la intervención humana, y garantizar la reproducibilidad (Parks et al., 2022). Poco se sabe de estrategias basadas en el IOT para el monitoreo de cultivos celulares en México, lo que abre una perspectiva de investigación para la implementación de dispositivos capaces de adquirir datos relevantes y procesarlos de forma remota (Capuzzo et al., 2020, p. 32).

Existen aproximaciones al monitoreo celular en tiempo real mediante técnicas avanzadas de bioingeniería como los modelos humanizados autoorganizados y las plataformas microfluídicas, los cuales permiten un seguimiento detallado de la penetración de la barrera hematoencefálica, la activación endotelial y la adhesión de leucocitos (Alia et al., 2021). No obstante, estas aproximaciones no suelen integrar una infraestructura IOT completa para la gestión y visualización de datos a distancia, lo que limita su aplicabilidad en contextos de monitoreo distribuido o de gran escala (Pérez et al., 2018, p. 1).

Se tiene evidencia sobre el uso de redes de sensores IOT para medición en tiempo real de variables críticas. Se han estudiado en la implementación de sistemas de sensores de pH y O₂ con biorreactores, con su comunicación respectiva inalámbrica hacia la nube (Andrade et al., 2025).

También se sabe sobre la implementación de plataformas IOT con controladores de bajo costo como Raspberry Pi/Arduino, lo que propicia la democratización de la información y la aplicación de bioelectrónica de bajo costo; su aplicación se ha demostrado en el monitoreo de desviaciones en condiciones de incubación a través de sensores comerciales (DHT11, MQ135)(M & Shanmugasundaram, 2021, p. 295).

En cuanto a las imágenes time-lapse con IOT, se tiene conocimiento de la viabilidad de integración de cámaras controladas por IOT para la captura periódica de imágenes, y procesadas mediante algoritmos de visión por computadora; un modelo pudo determinar patrones de diferenciación de células madre mesenquimales con más del 93% de precisión (Mai et al., 2023, p. 13). Los productos imagenológicos resultantes de los procedimientos descritos pueden ser analizados por tecnologías emergentes en la Edge Computing (Isosalo et al., 2023, p. 1).

Tendencias y Uso de Nuevas Técnicas

La tendencia actual se encamina hacia el uso de la Inteligencia Artificial y el análisis de anomalías celulares por medio de Redes Neuronales Convolucionales (Forslid et al., 2017; Pai, 2019, p. 91), y el uso de sensores wearables para organoides, como parches flexibles con sensores de oxígeno/pH adheridos a microdispositivos de cultivo (Sung et al., 2018; Velasco et al., 2020, p. 337). Estas innovaciones permiten un monitoreo continuo y no invasivo del microambiente celular, facilitando la detección temprana de desviaciones en las condiciones óptimas y promoviendo la investigación sobre el ciclo celular y la cinética de crecimiento (Jarrige, 2023, p. 159). Esta integración de tecnologías, desde la detección avanzada hasta el análisis predictivo, es crucial para la fabricación a gran escala de productos de medicina regenerativa, ya que aborda desafíos de reproducibilidad y estandarización (Doulgkeroglou et al., 2020; Lee et al., 2024). Este enfoque permite la cuantificación de atributos críticos de calidad celular a nivel unicelular o pericelular, esencial para la producción fiable y controlada de productos celulares y tisulares (Henn et al., 2023).

La disponibilidad de sensores de bajo costo conectados a dispositivos igualmente económicos permite interrogar en tiempo real el comportamiento de células, tejidos y órganos cultivados, posibilitando la generación de datos multipunto y su análisis algorítmico (Mata et

al., 2017, p. 93). Esta capacidad de generar y analizar grandes volúmenes de datos habilita la aplicación de inteligencia artificial y aprendizaje automático para predecir la actividad y potencia de las células, optimizar el diseño terapéutico, y mejorar la caracterización celular (Abuarqoub & Mutahar, 2025).

Por ejemplo, el aprendizaje automático se ha empleado con éxito para la clasificación morfológica de células, incluyendo organoides de islotes pancreáticos e imágenes de cardiomiocitos derivados de células pluripotentes inducidas (iPS-CM)(Vo et al., 2024, p. 7). Esta aproximación permite no solo la cuantificación objetiva de las capacidades de diferenciación trilineal de células madre mesenquimales mediante herramientas de análisis digital de imágenes, sino también la segmentación y clasificación automatizada de células (Eggerschwiler et al., 2019, p. 817; Zhai et al., 2019).

Capítulo III. Marco Teórico

El presente capítulo establece el marco teórico que sustenta el proyecto terminal de IOT, integrando conceptualmente cuatro pilares fundamentales. Se parte de la fisiopatología del endotelio como órgano clave, cuya disfunción constituye un evento patogénico temprano y central en numerosas enfermedades crónicas (Ambrosino et al., 2021). La innovación de este proyecto reside en la convergencia del monitoreo remoto con los paradigmas del Internet de las Cosas (IOT), que permite el monitoreo constante, programado y automatizado, así como la captura automatizada de datos en tiempo real. Con ello se facilita el acceso bajo demanda, el procesamiento de datos centralizado y el futuro análisis de imágenes en este proyecto, sentando las bases metodológicas para una medicina traslacional, deslocalizada y basada en datos.

El Endotelio

El endotelio es una capa de células que recubren los vasos sanguíneos; forma una sola capa de células que recubren las paredes internas de los vasos sanguíneos y linfáticos, incluidas arterias, venas, capilares y capilares linfáticos (Savicheva et al., 2025, p. 4427). Desempeña un papel crucial en el mantenimiento del tono vascular, la coagulación sanguínea y la respuesta inmunológica (Ricard et al., 2021); regula los intercambios entre el torrente sanguíneo y los tejidos circundantes (Alberts et al., 2001); el endotelio se especializa en transportar sangre y otras sustancias al cuerpo (Shuvaev et al., 2015, p. 579).

El endotelio controla la relajación y contracción de los vasos sanguíneos (Marino et al., 2024, p. 1092). Cuando el endotelio está sano, mantiene los vasos sanguíneos relajados y lo suficientemente abiertos para permitir un flujo sanguíneo adecuado (Deshpande et al., 2016, p. 134). Esta función está influenciada por diversos estímulos, como la presión, el nivel de estrés, la temperatura y los medicamentos (Михайличенко & Шаповалов, 2019, p. 5).

En respuesta a estímulos como la temperatura, el endotelio puede dilatar o contraer los vasos sanguíneos para regular el flujo sanguíneo y la temperatura. Por ejemplo, en climas fríos, los vasos sanguíneos de las extremidades se contraen para preservar el calor corporal; en climas cálidos, se dilatan para disipar el calor (Alali et al., 2020, p. 1376).

El endotelio también es responsable de gestionar el flujo de líquidos entre los vasos sanguíneos y los tejidos. Es lo suficientemente permeable como para permitir el paso de líquidos, pero su permeabilidad se puede regular en función de las necesidades de los diferentes tejidos (Mintet, 2015; Shuvaev et al., 2015, p. 83).

Las células endoteliales, organizadas en una monocapa celular, actúan como un órgano endocrino crucial que regula funciones esenciales como la filtración de fluidos, el tono vascular y la hemostasia (Pacheco, 2014, p. 1). Por consiguiente, cualquier alteración o afección que comprometa la integridad de este endotelio puede desencadenar diversas patologías sistémicas, entre las que destacan la aterosclerosis y otras enfermedades cardiovasculares relacionadas (Carvajal, 2017, p. 86; Páez et al., 2019); si bien formalmente su función principal es vascular y paracrina, la literatura científica moderna coincide con Pacheco (2014) al considerarlo un órgano endocrino crucial debido a su enorme impacto metabólico y sistémico (Baumgartner-Parzer & Waldhäusl, 2001).

En la disfunción endotelial, el endotelio pierde su capacidad para regular estas funciones, lo que conduce a un aumento de la permeabilidad vascular, la agregación plaquetaria y las vías proinflamatorias y procoagulantes (Poredoš & Ježovnik, 2012, p. 2); Esta disfunción puede ser causada por diversas afecciones médicas y factores del estilo de vida, como aterosclerosis, presión arterial alta, diabetes, colesterol alto, tabaquismo e inflamación crónica (Fрати-Munari, 2013, p. 304).

Células Formadoras de Colonias Endoteliales

Las CFCE son una población única de células progenitoras que tienen el potencial de promover la revascularización, un proceso que implica el crecimiento de nuevos vasos sanguíneos, denominado angiogénesis (Faris et al., 2020).

Estas células también tienen la capacidad de formar colonias *in vitro*, lo que las involucra en la formación de vasos sanguíneos y la reparación vascular (Rossi et al., 2019, p. 4). Se pueden aislar de sangre periférica o de cordón umbilical y pueden ser cultivadas o expandidas *in vitro*; son altamente proliferativas (Schwarz & Yadegari, 2023, p. 325)

La formación de colonias de CFCE es un proceso de varios pasos que implica la proliferación y diferenciación de células progenitoras endoteliales adultas (EPC, por sus siglas en inglés) en la vascularización adulta (Li et al., 2012, p. 1001).

Principales Pasos en la Formación de CFCE

Proliferación: Las EPC adultas, que también se encuentran en la vascularización adulta, pueden autorrenovarse y diferenciarse en CFCE (Richardson & Yöder, 2010, p. 270).

Diferenciación: Las CFCE pueden migrar a áreas lesionadas y desempeñar un papel fundamental en la curación vascular y la angiogénesis del desarrollo (O'Neill et al., 2018, p. 5).

Formación de colonias: Una vez que alcanzan el sitio de la lesión, las CFCE forman colonias de células que progresan rápidamente a redes similares a capilares *in vitro* (Moccia et al., 2012, p. 5803).

Mantenimiento del potencial proliferativo: Un subconjunto de CFCE, denominadas células formadoras de colonias endoteliales de alto potencial proliferativo (HPP-CFCE),

retienen altos niveles de actividad de telomerasa y mantienen una alta tasa de duplicación de la población (Lois et al., 2014, p. 4).

Identificación: Los CFCE pueden identificarse, utilizando técnicas inmunológicas, mediante ciertos marcadores, incluidos CD34, CD31, VEGFR2, eNOS, CD105 y vWF (Sandhu et al., 2017, p. 2).

Disfunción Endotelial y COVID-19

La disfunción endotelial desempeña un papel crítico en la fisiopatología de la COVID-19, manifestándose a través de procesos de inflamación sistémica, trombosis y esteres oxidativo (Fodor et al., 2021). Este trastorno es un hallazgo común y severo en la infección por SARS-CoV-2, particularmente en pacientes que presentan comorbilidades previas (Gu et al., 2020; Zhang et al., 2020). El mecanismo inicial se desencadena por la interacción directa del virus con la enzima convertidora de angiotensina 2 (ECA2) en la superficie celular (Cano et al., 2020).

A nivel fisiológico, el tejido endotelial pierde su capacidad homeostática, lo que incrementa la permeabilidad vascular y la agregación plaquetaria a través de la activación de vías proinflamatorias y procoagulantes que perpetúan el estado patológico sistémico (Roberts et al., 2020, p. 4). Estas vías son impulsadas por la liberación masiva de citocinas, quimiocinas y plaquetas activada. Dicho ambiente induce la expresión de moléculas de adhesión celular y la inhibición de la óxido-nítrico-sintasa endotelial (eNOS), provocando un desequilibrio en la producción de óxido nítrico (NO) y una activación endotelial anómala (Ma et al., 2021; Theofilis et al., 2021). Este desbalance promueve un incremento de factores procoagulantes y una reducción de anticoagulantes naturales, elevando el riesgo de complicaciones trombóticas graves como la microangiopatía y el tromboembolismo, los cuales pueden culminar en falla multiorgánica (Pelle et al., 2022).

A pesar de estos avances, aún falta por comprender con precisión el comportamiento de las CFCE ante diversos estímulos biológicos. Actualmente, su seguimiento se realiza mediante técnicas analógicas y manuales en el laboratorio, como tinciones o inmunofluorescencia, los cuales dependen de la intervención humana para el registro mecánico de imágenes a través de microscopios. Esta metodología limita la recolección de datos, por lo que resulta imprescindible implementar un monitoreo sistemático, automático y continuo por periodos prolongados en ambientes controlados. Para solventar esta limitación, la incorporación de sistemas basados en el IOT, se presenta como una herramienta tecnológica útil para optimizar el estudio de las CFCE o cultivos celulares, al proporcionar datos en tiempo real y reducir la dependencia de los métodos tradicionales (Parks et al., 2022).

Monitoreo Remoto de CFCE

Los Sistemas de Monitoreo Remoto (SMR) son reconocidos como tecnología emergente (Peyroteo et al., 2021); y para fines de este proyecto, se utilizarán sensores y dispositivos vestibles para la recolección de datos, así como canales de comunicación que permitan la configuración de tecnologías y protocolos de intercambio de información inalámbrica para su recopilación, su almacenamiento, proceso y obtención de nueva información. Se entiende como Internet de las Cosas (IOT, por sus siglas en inglés) a una infraestructura global que hace posible la oferta de servicios como resultado de la interconexión de objetos físicos y virtuales mediante la interoperabilidad de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) tanto presentes como futuras (Rueda & Portocarrero, 2017, p. 59).

El paradigma del IOT deriva en distintas convergencias y verticalidades asociadas al sector productivo y oferta de variedad de servicios, así, encontramos ya mercados de oportunidad en lo que se llama IOT personal, agricultura y ganadería inteligentes, autos

conectados, venta minorista inteligente, industria IOT o 4.0, ciudades inteligentes, edificios inteligentes, casa conectada o inteligente, sin faltar la medicina IOT

Internet de las Cosas Médicas

Se conoce como Internet de las Cosas Médicas (IOMT, por sus siglas en inglés) a la utilización de dispositivos médicos para intercambiar datos entre sí y conectarse mediante redes wifi (Khamees et al., 2021, p. 4159). El principal uso de este paradigma es monitorear en tiempo real pacientes y dispositivos y enviar datos con el fin de evaluar su estado de salud e intervenir oportunamente antes de que se presente un problema (Filho et al., 2023, p. 291).

Esta infraestructura de la IOMT posibilita la interconexión de sistemas de TI sanitarios a través de redes informáticas en línea, permitiendo el almacenamiento y análisis de los datos capturados en plataformas en la nube, como Amazon Web Services (Reina-Cufiño, 2021, p. 86). El procesamiento y análisis de estos datos, que a menudo incluyen información biométrica y de signos vitales, se lleva a cabo mediante algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático para identificar patrones y predecir posibles complicaciones clínicas.

La integración de la IOMT permite una recopilación autónoma de datos fisiológicos y ambientales, facilitando el monitoreo continuo de pacientes y la optimización de protocolos clínicos (Luna-González et al., 2020; Zhou et al., 2025). Esta integración del IOT en el sector de la salud permite la unificación de la telemática y la domótica, agilizando la atención al paciente dentro y fuera de los entornos hospitalarios mediante el monitoreo de dispositivos médicos (Suárez et al., 2019, p. 290).

Laboratorios Remotos

Los laboratorios remotos son una innovación reciente en los campos educativos y de investigación; estos permiten a los usuarios realizar experimentos y recopilar datos de manera ubicua a través de Internet (Azad, 2020, p. 95). Por lo general, se implementan en una

arquitectura cliente-servidor para establecer el control y acceso a equipos reales o físicos, lo que incrementa el aprovechamiento de instalaciones y laboratorios convencionales (Addam et al., 2019, p. 98).

El concepto de laboratorios inteligentes potenciados por IOT, en el ámbito profesional, se refiere a la mejora de la eficiencia, la precisión en las mediciones y la colaboración científica mediante el aprovechamiento de la tecnología IOT (Ananikov, 2024, p. 100088). Es la integración de dispositivos, sensores y análisis de datos para supervisar y controlar los procesos dentro de un laboratorio en tiempo real (Elias et al., 2020, p. 1). Esto tiene la finalidad de automatizar tareas rutinarias, optimizar recursos y reducir errores. Todo ello para mejorar la toma de decisiones basada en datos y para la obtención de resultados innovadores (Batkamwar et al., 2023, p. 543).

En contraste con los procesos tradicionales, en los cuales los escenarios recaen en procesos manuales, documentación en papel e instrumentación autónoma, proclives al error humano y con escalabilidad limitada, el cambio de paradigma a laboratorio inteligente se enfoca en la automatización, conectividad, incluyendo el equipamiento actual que carece de ella (Ananikov, 2024).

Con ello se origina una sinergia entre campos interdisciplinarios, que incluso conlleva al desarrollo de Internet de las Cosas Robotizadas (IORT). Esto es posible gracias a la interconexión de sensores biológicos con plataformas IOT, y elementos robóticos para monitorear cultivos celulares, cinética enzimática de manera no invasiva y automática, lo que a su vez posibilita estudios longitudinales y en condiciones experimentales dinámicas (Srivastav et al., 2023a).

Sistemas de Monitoreo Remoto

Los Sistemas de Monitoreo Remoto permiten supervisar y gestionar dispositivos y sistemas conectados de manera remota para el monitoreo automático de procesos grandes y complejos, la función básica es recolectar datos, analizarlos y mejorar la toma de decisiones (Colombia et al., 2020).

Una plataforma Web IOT permite ingresar, almacenar, procesar y visualizar datos de sistemas de sensores. Asimismo, permite controlar dispositivos IOT desde la plataforma. Existen plataformas IOT públicas y privadas, y a su vez, pueden ser comerciales o personales. Dependiendo de las características, propósitos y objetivos de un proyecto, se elegirá una u otra modalidad (Hejazi et al., 2017, p. 2).

Los sistemas de gestión de información de laboratorios (LIMS, por sus siglas en inglés) representan un nuevo paradigma que cambia la forma en que se puede desarrollar la investigación científica, así como su gestión, puesto que se genera una gama de herramientas y funcionalidades que posibilitan de manera comprensiva las operaciones, manejo de datos a la vez que facilitan la cooperación científica al automatizar tareas rutinarias, minimizar riesgo de errores en mediciones y proveen una plataforma centralizada de almacenamiento y colaboración; los LIMS sirven como catalizador para la innovación (Srivastav et al., 2023b).

Ubidots®: Plataforma Comercial IOT

Existen plataformas web IOT como Ubidots®, plataforma de Software para Industria 4.0 con sede en Colombia, esta empresa provee herramientas para que empresas y personas puedan construir y desplegar proyectos IOT, entre sus servicios se encuentran: la conexión de dispositivos, y su envío de datos a la nube; visualización de datos, que procesa automáticamente y permiten personalización e interacción en tiempo real, entre otros servicios (Ubidots, 2024).

Se tiene evidencia de la viabilidad en la implementación de este tipo de sistemas a través de la integración de tecnologías libres y dispositivos electrónicos a un bajo costo para un biobanco en Colombia. Con esta implementación se registró y envió alerta sobre los incidentes y factores críticos de un biobanco (Luna-González et al., 2020).

Por otra parte, Rivas y colaboradores, han reportado la aplicación de la telemática para el monitoreo de bancos de muestras biológicas; se registró y envió alertas sobre incidentes de temperatura fuera de rango y fallas de comunicación (Rivas et al., 2023).

Los Sistemas de Monitoreo Remoto también se implementan para la medición de condiciones medioambientales en salas de cirugía, así, el monitoreo contribuye al seguimiento de normas y estándares para la supervisión del aire y el transporte de microorganismos; con ello se impacta en la calidad de servicios enfocados a la seguridad del paciente (Angarita & Hidalgo, 2020).

Protocolos de Comunicación en IOT

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), es un protocolo de comunicación para la conexión entre Ubidots® y los datos censados por el ESP32-S3 de los sensores respectivos; este protocolo habilita la comunicación entre dispositivos y un broker para transmitir información entre un dispositivo y el broker, y entre el broker y un segundo dispositivo, en redes Wifi diferentes.

El protocolo MQTT es ligero y eficiente y fue diseñado expresamente para el intercambio de datos entre dispositivos, particularmente cuando los escenarios y el ancho de banda son limitados (Shah, 2024, p. 1065). Fue desarrollado por IBM a finales de los años 1990; es uno de los protocolos más populares y seleccionados para establecer comunicaciones *machine-to-machine* (M2M)(Yalçinkaya et al., 2020, p. 319).

Para que lo anterior sea posible, también es necesario JSON (*JavaScript Object Notation*, por sus siglas en inglés), con lo que se puede combinar varios valores de variables como cadena de texto, los cuales son enviados por el servidor al cliente. El texto JSON, consta de pares de nombre y valor de variable, cada uno entre comillas dobles y separados por dos puntos. Esos pares, tienen que estar separados por una coma; los valores del texto deben estar entre llaves (Lee et al., 2020).

Instrumentos de Observación Avanzados

Microscopios de fluorescencia: Permiten observar células marcadas con fluorocromos. Son más costosos y requieren de equipamiento adicional.

Sistemas de video microscopía time-lapse automatizados (Sprenger et al., 2012): Equipos especializados que permiten capturar imágenes a intervalos regulares durante largos periodos. Son de costos elevados, voluminosos.

Incubadoras inteligentes con sensores integrados: Control ambiental preciso, pero a menudo sin capacidad de imagenología celular in situ (Talebipour et al., 2024, p. 2).

Citómetros de flujo: Para análisis celular rápido, pero a menudo no son adecuados para monitoreo continuo en incubadoras en tiempo real (Guez et al., 2023, p. 2).

En este contexto y como resultado, podemos sintetizar el paradigma de la Cuarta Revolución Industrial (4IR), en la que los avances tecnológicos sin precedentes impactan todos los sectores de actividad humana; incluida la salud. Y la cual se caracteriza por la intersección de innovaciones digitales, biológicas, y físicas, en gran parte, gracias a la miniaturización de chips y sensores, la democratización del acceso a la información, el acceso a software y hardware abiertos, la inteligencia artificial, y benefician a los sistemas de salud y la forma en que se desarrolla e innova en investigación biomédica, y servicios de salud (Castro & Araújo, 2020, p. 92; Park, 2016; Vargas-Elizondo, 2020).

Restricciones:

Tamaño: Los equipos avanzados suelen ser voluminosos y no caben en una incubadora estándar (Çetin, 2023, p. 2; Talebipour et al., 2024).

Costo: Los sistemas automatizados de video microscopía pueden costar decenas de miles de dólares, incompatibilidad con incubadoras estándar y la imposibilidad de integración IOT.

Los Sistemas de Monitoreo Remoto (SMR) se reconocen como tecnología emergente; y para fines de este proyecto integrador, se utilizarán sensores y dispositivos usables para la recolección de datos, así como canales de comunicación que permitan la configuración de tecnologías y protocolos de comunicación inalámbrica para el intercambio de datos, su almacenamiento, proceso y obtención de nueva información (Peyroteo et al., 2021).

Usabilidad e Instrumentos para Evaluación

La usabilidad en las etapas tempranas del diseño de interfaces para IOT es necesaria dada la interacción con el mundo físico. Tanto en el ámbito de las tecnologías digitales de comunicación como son las aplicaciones para dispositivos móviles o los sitios web, como en los sistemas de IOT se busca superar la brecha de abandono por la deficiencias en el uso de estas.

Por lo anterior, dado que la validación de la solución propuesta y como parte del sistema para el monitoreo, se desarrolló una interfaz HMI y para este estudio se utilizó el instrumento Escala de Usabilidad de Sistemas (SUS por sus siglas en inglés), la cual se describirá a continuación:

El SUS se utiliza ampliamente como instrumento para evaluar la usabilidad de sistemas. Es un cuestionario que consta de diez ítems, y se evalúa por medio de una escala tipo Likert de 5 puntos, donde 1 es “totalmente en desacuerdo” y 5 “totalmente de acuerdo (Brooke, 1996). Este instrumento se abarcan aspectos de usabilidad, como la facilidad de uso, la necesidad de soporte técnico, y la confianza reportada por el usuario del sistema o aplicación. Se obtiene una puntuación que va de 0 a 100, en la que una puntuación mayor a 68 se considera aceptable. Se

recomienda evaluar la usabilidad en las diferentes etapas de un desarrollo tecnológico, tanto en pruebas piloto como en evaluaciones posteriores a la puesta en producción de los sistemas o aplicaciones.

Cabe señalar que, para este estudio, como ya se ha mencionado, se utilizó una versión validada en español que se denomina positiva, y que fue validada en población mexicana (Aguilar & Villegas, 2016, p. 5; Sevilla-González et al., 2020). Se utiliza este instrumento por su simplicidad y eficiencia, versatilidad, confiabilidad y validez, asimismo, por su interpretación estandarizada.

Finalmente se implementaron los cambios y ajustes necesarios y así se aseguró el cumplimiento de estándares de calidad (ISO UX)(Herendy, 2017, p. 3).

Capítulo IV. Marco Metodológico

Diseño de la Solución

Este capítulo detalla el diseño y arquitectura de un sistema integral que se fundamenta en los paradigmas del Internet de las Cosas (IOT), lo cual facilita la captura, transmisión, procesamiento y visualización de imágenes y datos medioambientales en un entorno controlado (incubadoras y laboratorio) para muestras celulares. La propuesta arquitectónica estructurada en capas abarca desde el nivel físico, con cámaras miniaturizadas y dispositivos tanto alámbricos como inalámbricos hasta el nivel de aplicación, donde una plataforma central en la nube agrega la información, genera paneles de control, para la interpretación de datos en tiempo real.

Este diseño prioriza la confiabilidad en la transmisión de datos, la seguridad de la información biomédica, la escalabilidad de la infraestructura y la usabilidad para el usuario final, sentando las bases técnicas para una evaluación continua y no invasiva de la salud vascular en entornos ambulatorios.

Para la construcción del prototipo se requirió de los siguientes componentes:

Componentes:

- ESP32-S3 Microcontrolador principal, con Wi-Fi y Bluetooth.
- Placa de conexión para ESP32-S3; para facilitar conexiones.
- Sensor DHT11: Mide temperatura y humedad
- Cámara OV3660: Sensor de imagen de 2MP para capturar imágenes.
- Dispositivo HMI Nextion (Pantalla táctil de 10 pulgadas NX1060P101-011C-I) para interfaz de usuario

- Módulo de tarjeta SD: para almacenamiento local

En la siguiente tabla se resumen los componentes que se usan en la propuesta a desarrollar:

Tabla de componentes utilizados en el proyecto

Nombre del Componente	Descripción	Elemento físico	Cantidad
Nextion Pantalla inteligente HMI de 10.1 pulgadas NX1060P101-011C-I	Pantalla táctil capacitiva LCD-TFT 1024 x 600		1
Freenove Placa de conexión paracabezal de clavija, salidas de ESP32/ESP32-S3 WROVER WROOM	Escudo de bloque de terminales con alimentación de 5 V 3,3 V, LED de estado GPIO		1
Freenove ESP32-S3 WROOM CAM Board (flash de 16 MB)	Microcontrolador de doble núcleo de 32 bits de 240 MHz, cámara inalámbrica integrada		1
Cámara	Tamaño pequeño: el ESP32-CAM tiene un módulo de cámara compacto y eficiente que puede funcionar de forma independiente como un mini sistema, mide solo 27 x 40,5 x 4,5 mm, con		1

	corriente en modo de reposo profundo y tan baja como 6 mA Método de conexión fiable: ESP-32CAM está empaquetado en DIP y se puede conectar directamente al plano posterior para una producción rápida; proporciona a los clientes un método de conexión fiable y es conveniente para su uso en varios terminales de hardware IOT. Bajo consumo de energía: la corriente de sueño profundo es tan baja como 6 mA; es un pequeño módulo compatible con 802.11b/g/n Wifi + BT/BLE SoC Fuerte compatibilidad: compatible con los estándares Wifi 802.11b/g/n/e/i y 4.2, se puede aplicar como un modo maestro para construir un driver de red independiente, o como esclavo de otros MCUs host para añadir capacidades de red a dispositivos existentes Amplias aplicaciones: ESP-32CAM se puede aplicar ampliamente en varias aplicaciones IOT; es adecuado para dispositivos inteligentes domésticos, control inalámbrico industrial, monitoreo inalámbrico, QR, señales de		
--	--	--	--

	sistema de posicionamiento inalámbrico y otras aplicaciones IOT.		
Módulo Digital DHT11	Módulo Sensor De Temperatura Y humedad relativa multicolor		1
Card Reader			1
SD card			1
9V Cable para batería			1
EPC Cable para video cámara	Cables para microcontrolador y placa de conexión		2
Manos de ayuda magnéticas con lámpara de lupa.			1

Arquitectura Básica De IOT

En la siguiente ilustración se describe un modelo arquitectónico de capas para el ecosistema de Internet de las Cosas (IOT), estructurado bajo una disposición vertical y jerárquica. Esta organización taxonómica permite una compartimentación funcional de los componentes, optimizando los procesos de diseño de la implementación y con fines de garantiza la escalabilidad del sistema. (Figura 1).

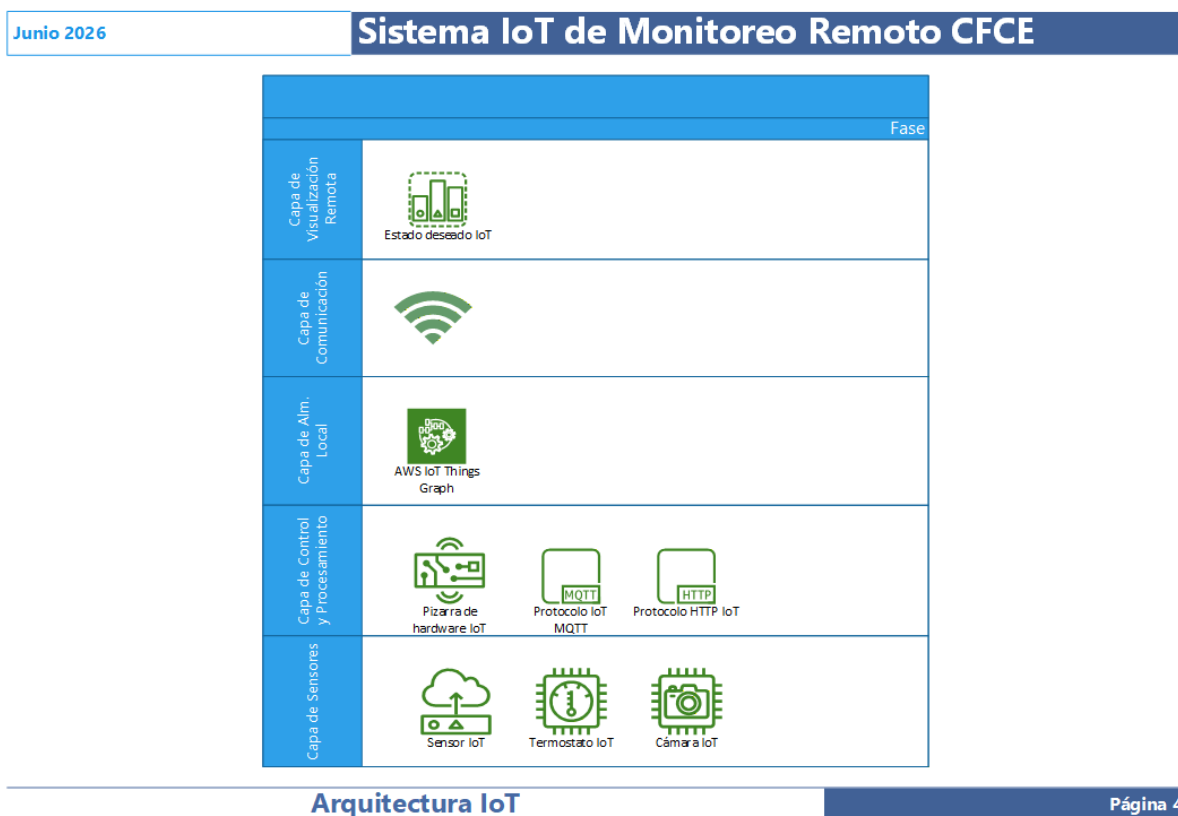


Figura 1. Arquitectura de Sistema para Monitoreo Remoto. Fuente: Elaboración propia.

Proceso de Monitoreo de CFCE

En el esquema se ilustra el flujo lógico del sistema embebido IOT concebido para la telemonitorización. Dicho proceso se organiza en un bucle principal que administra la inicialización, la captura sincrónica de datos multisensoriales y su transmisión a una plataforma de computación en la nube para su visualización.

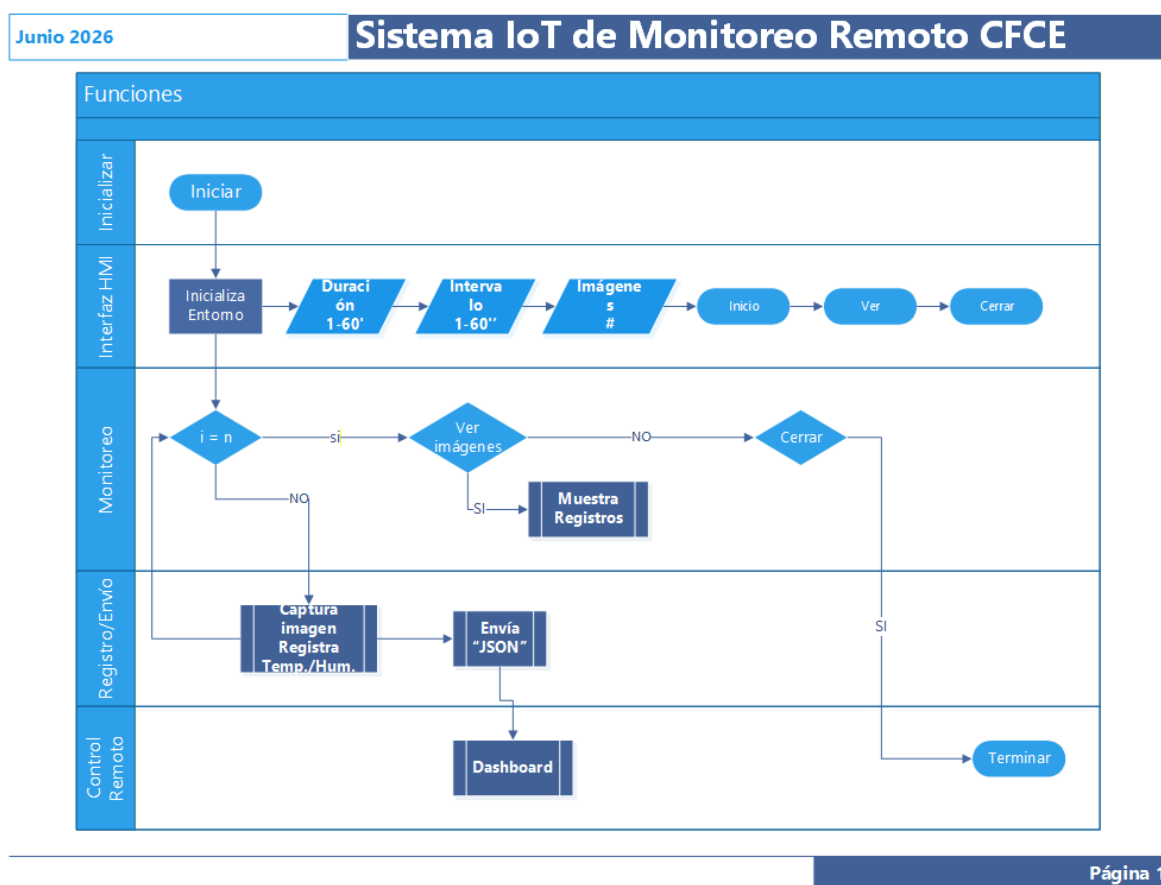


Figura 2 Funciones Principales del Sistema IOT. Fuente: Elaboración propia.

Flujo de Datos Sistema IOT

El presente esquema ilustra el flujo funcional del sistema IOT, gestionado a través del panel de control en la pantalla HMI Nextion. (Figura 3.).

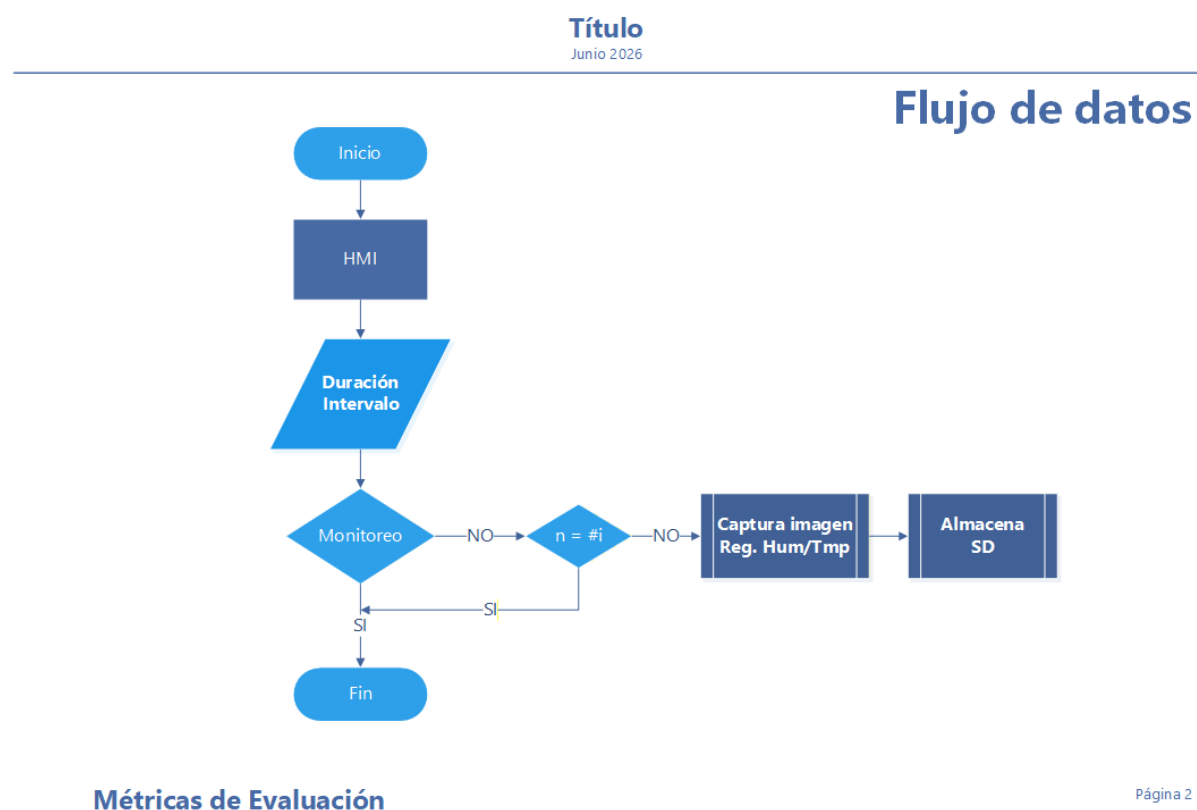


Figura 3 Flujo de Datos del Sistema IOT. Fuente: Elaboración propia.

Diagrama de Secuencia UML

El diagrama de secuencia ilustrado modela el comportamiento dinámico del sistema IOT embebido, en él se detalla la secuencia de estados y transiciones que se producen desde la interacción del usuario hasta la operación autónoma del sistema. Este modelo se fundamenta en un paradigma de comunicación bidireccional, en el que la interfaz humano-maquina funge como elemento disparador inicial y el microcontrolador ESP32 como núcleo central de procesamiento. (Figura 4)

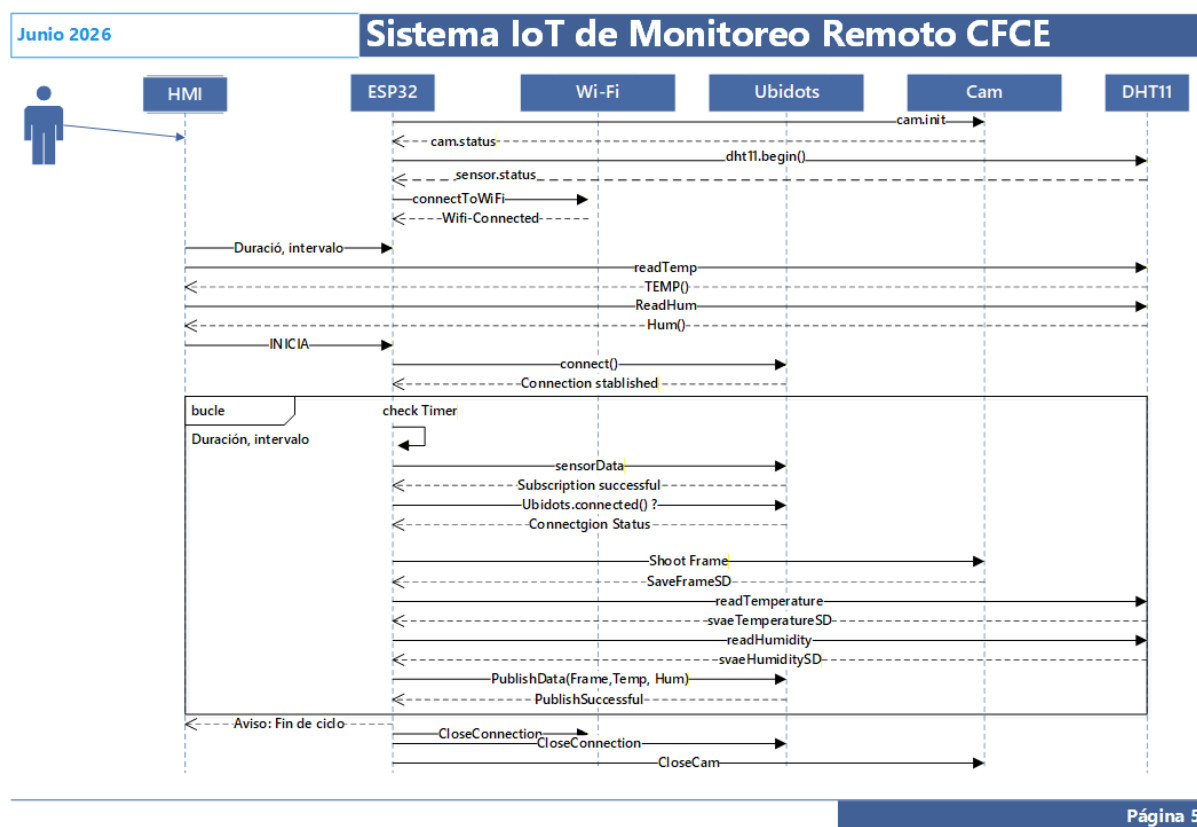


Figura 4. Diagrama de Secuencia UML. Fuente: Elaboración propia.

Panel de Control o Dashboard en Ubidots®

Se presenta una representación gráfica del panel de control desarrollado en la plataforma en la nube Ubidots.

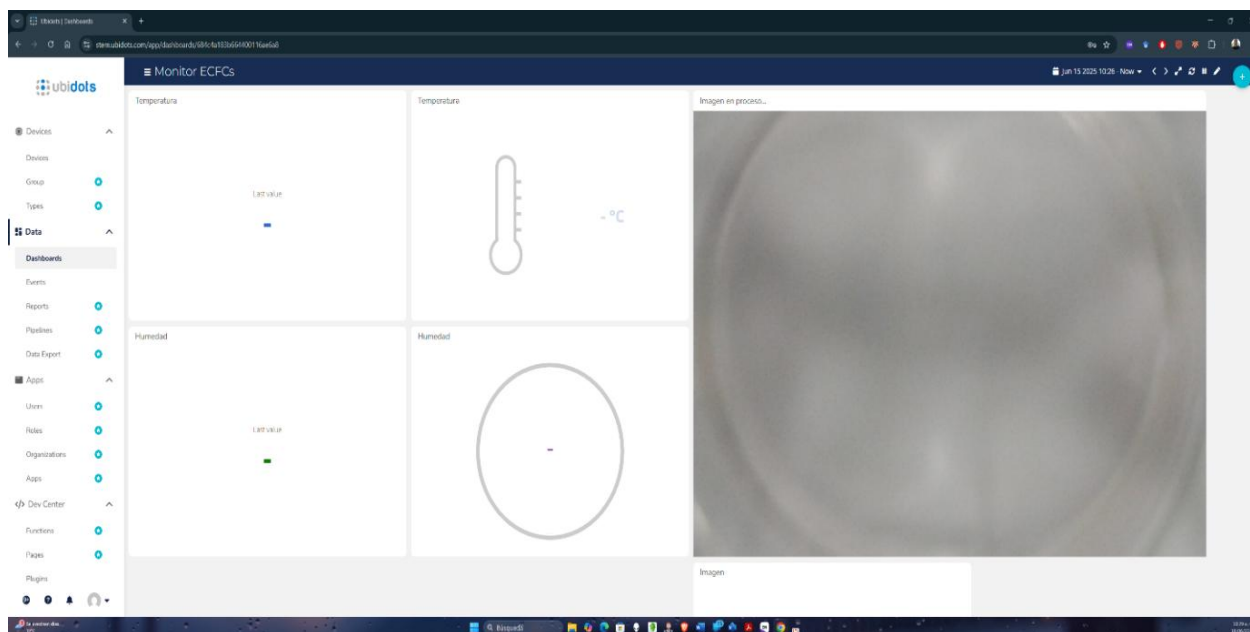


Figura 5. Sistema Web IOT Ubidots. Fuente: Elaboración propia.

Evidencia gráfica del panel de control en Ubidots®

Captura de pantalla de la implementación del panel de control en funcionamiento en la plataforma cloud Ubidots®.

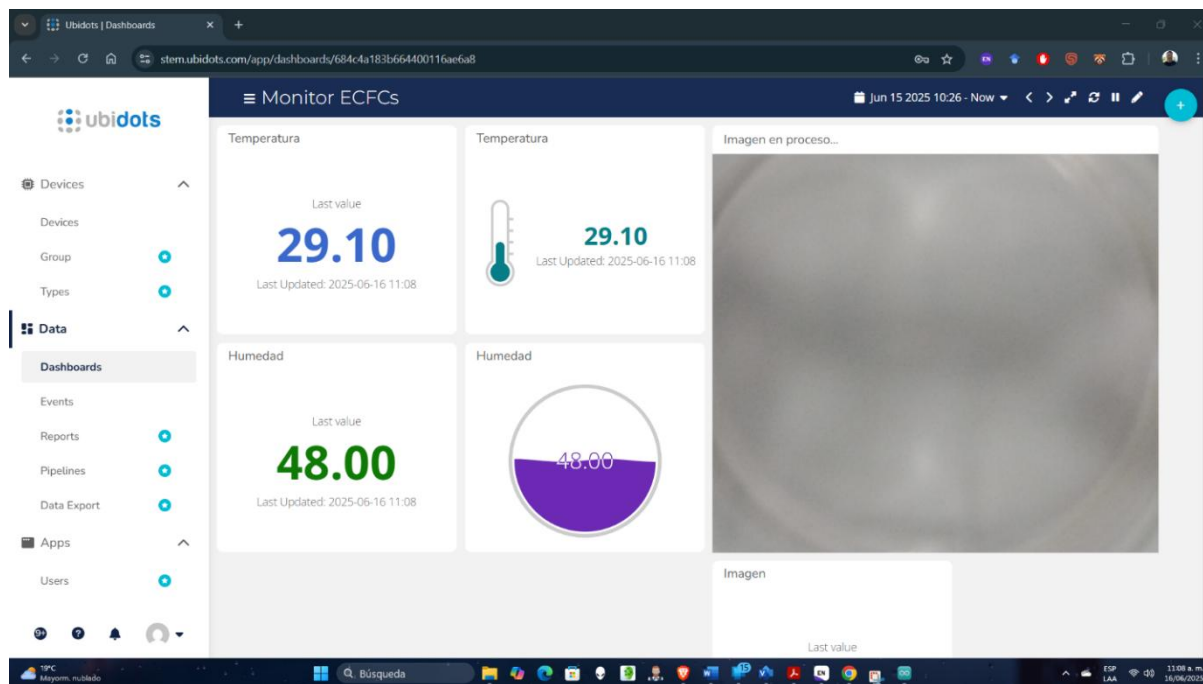


Figura 6. Plataforma Web IOT Ubidots. Fuente: Elaboración propia.

Entorno y condiciones de prueba

- Ubicación: Incubadora de CO₂ estándar, mantenida a 37°C, 5% CO₂ y humedad relativa del 95%.
- Duración: Pruebas continuas durante 24 horas
- Muestra: Cultivo de células endoteliales en una caja de Petri o placa de cultivo celular.
- Configuración: El sistema IOT estará colocado dentro de la incubadora, con la cámara OV3660 enfocada hacia la muestra. El sistema debe ser compacto para no alterar las condiciones internas.
- Los componentes del sistema deberán pasar un proceso de esterilización con luz UV.

Solución IOT Propuesta

Un sistema IOT compacto basado en ESP32-S3 que:

- Monitorea las células mediante la cámara OV3660, tomando imágenes a intervalos configurables
- Mide la temperatura y humedad con un sensor DHT11
- Permite al usuario configurar la duración (1-60 min) y el intervalo (en segundos) mediante una interfaz HMI Nextion (NX1060P101-011C-I)
- Almacena las imágenes y los datos ambientales en una tarjeta SD.
- Transmite los datos (imágenes y datos ambientales) a la plataforma Ubidots® para visualización remota.

Arquitectura de la Solución IOT

- Capa de sensores: DHT11 (temperatura/humedad) y OV3660 (imágenes).
- Capa de control y procesamiento: ESP32-S3, que ejecuta el firmware para:
 - Leer los sensores
 - Controlar la HMI Nextion (para configuración)
 - Almacenar datos en la SD
 - Transmitir datos a UBIDOTS vía Wifi.
- Capa de almacenamiento local: Tarjeta SD para respaldo de imágenes y datos.
- Capa de Comunicación: Wifi del ESP32-S3 para enviar datos a la nube (Ubidots®).
- Capa de visualización remota: Plataforma Ubidots® para monitoreo en tiempo real.

Interconexiones

- DHT11 conectado a un Pin digital del ESP32-S3.
- OV3660 conectada mediante interfaz de cámara (I2C, DVP o MIPI, dependiendo del módulo)
- Nextion conectada por UART.
- Tarjeta SD mediante interfaz SPI.

Funcionalidades Detalladas

Interfaz HMI Nextion:

- Pantalla con dos sliders: una para duración (1-60 min.) y el otro para intervalo (1-60 s. o rango adecuado).
- Botón de inicio/parada
- Visualización del cálculo del número de imágenes: $N \text{ imágenes} = \frac{\text{duración (s.)}}{\text{intervalo (s.)}}$

Interconexión de prototipo de monitoreo remoto

La interacción usuario-sistema se lleva a cabo mediante una interfaz humano-máquina, la cual se comunica con el microcontrolador ESP32; este, a su vez, se conecta a los sensores óptico y de temperatura/humedad relativa. Paralelamente, se inicializa un bróker para gestionar las transacciones de datos hacia la plataforma Ubidots®, procesándolos posteriormente para su visualización en el panel de control.

Sistema IoT de Monitoreo Remoto ECFCs

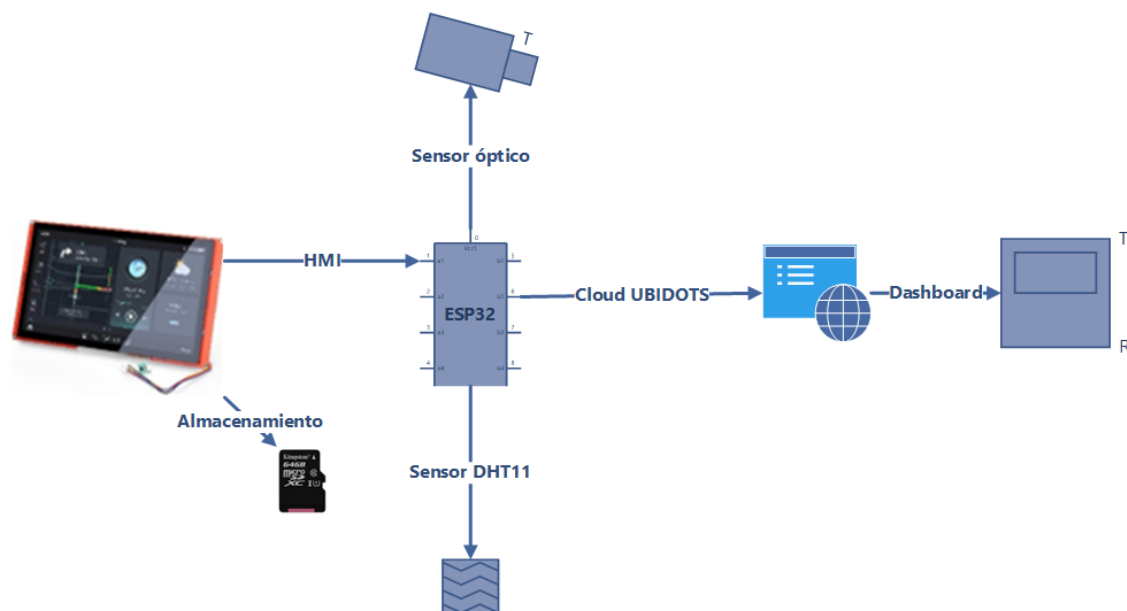


Figura 7. Esquema General de Interconexión de componentes Sistema IOT.

Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de Usabilidad

Cinco es la muestra inicial para descubrir problemas de usabilidad (Nielsen et al., 2006). La evaluación de usabilidad en etapas tempranas de la HMI arrojó un promedio general de 91.25% aceptabilidad de la interfaz. Asimismo, la validación conceptual fue aceptada. Se procedió a implementar el circuito para la vigilancia/seguimiento de CFCE.

A continuación se presenta el registro en imágenes sobre los usuarios que accedieron a validar la interfaz de usuario desarrollada.



Figura 8. Pruebas de UX/UI en etapas tempranas de desarrollo. Usuario 1.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que se registraron además de datos cuantitativos a través del instrumento utilizado, percepciones cualitativas sobre aspecto y sugerencias para mejorar la accesibilidad a través de la interfaz de comunicación propuesta.

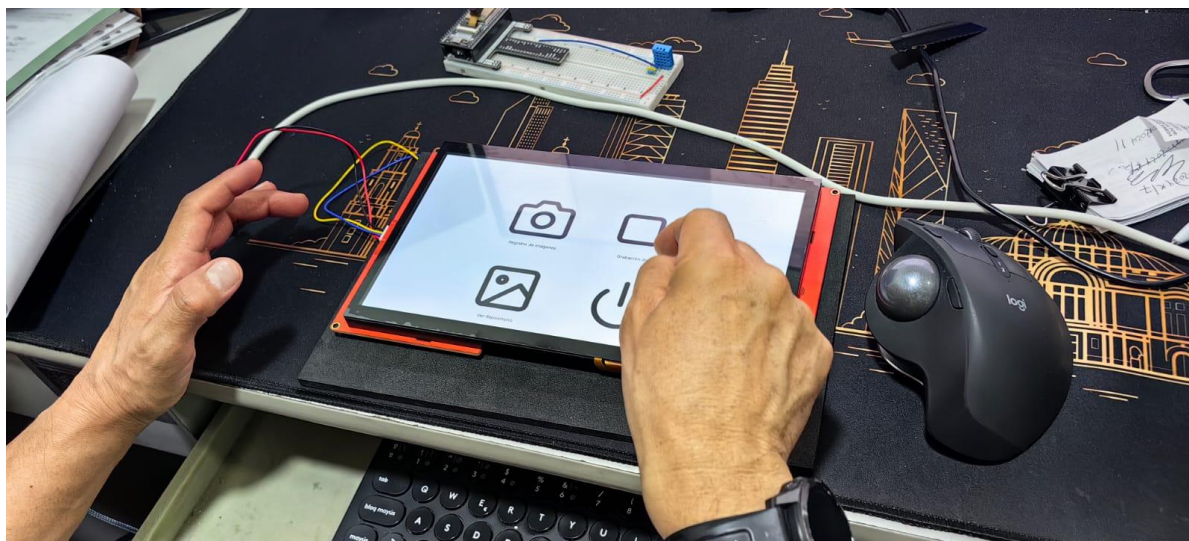


Figura 9. Pruebas de UX/UI en etapas tempranas de desarrollo. Usuario 2.

Fuente: Elaboración propia.

Captura de datos:

- El ESP32-S3 lee el DHT11 en cada intervalo y captura una imagen con la OV3660.
- Almacena en SD:
- Imágenes con nombre de archivo que incluye timestamp (p. ej., IMG_20250529_120030.jpg).
- Archivo CSV con timestamp, temperatura, humedad, y ruta de la imagen correspondiente.

Transmisión a UBIDOTS:

- En cada intervalo, envía un paquete con:
 - Timestamp
 - Temperatura y humedad
 - La imagen (como archivo binario) o una URL si se almacena en otro servidor (pero por simplicidad, en prueba de concepto (PoC) se envía la imagen en Base 64 o se almacena solo la ruta y luego se sube por separado). Dado que Ubidots acepta archivos, se puede enviar como variable de tipo “file”.

Flujo de datos

1. Configuración: El usuario establece duración e intervalo a través de HMI Nextion. El ESP32-S3 calcula el número de imágenes.
2. Inicio: Al presionar “inicio”, el sistema inicia un temporizador.
3. Bucle de captura:

- a. Espera el intervalo configurado.
 - b. Captura una imagen con el sensor
 - c. Lee DHT11
4. Almacena imagen en SD y registra en el CSV: timestamp, temp., hum, nombre imagen.
 5. Fin: Al completar la duración, el sistema se detiene y notifica al usuario.

Métricas de Evaluación

Junio 2026

Sistema IoT de Monitoreo Remoto CFCE

- ☐ Estabilidad del sistema: Tiempo de funcionamiento sin fallos en condiciones de incubadora.
- ☐ Calidad de imagen: Subjetiva (por un experto) y objetiva (resolución, contraste).
- ☐ Precisión de sensores: Desviación de temperatura y humedad respecto a un sensor de referencia de la incubadora.
- ☐ Latencia de transmisión: Tiempo entre captura y disponibilidad en UBIDOTS
- ☐ Usabilidad: Tiempo requerido para configurar una prueba mediante la HMI.
- ☐ Consistencia de datos: Porcentaje de imágenes y datos ambientales capturados exitosamente.

Métricas de Evaluación

Página 3

Figura 10. Métricas de Evaluación. Fuente: Elaboración propia.

Escenario:

- Se prepara un cultivo de células endoteliales en una placa de 6 pocillos.
- El sistema se coloca en la incubadora, con la cámara enfocada en un pozo.
- Se configura: duración = 30 min., intervalo = 30 s. -> 60 imágenes
- Se inicia el monitoreo
- Después de 30 minutos, se recupera el sistema y se extrae la tarjeta SD para verificar datos.
- Se revisa Ubidots® para ver los resultados en tiempo real.

Dada la restricción de tiempo en laboratorio por actividades cotidianas de experimentación y seguimiento de estudios propios de la unidad de investigación, se permitió la ocupación de incubadoras para simular el entorno de monitoreo remoto por un breve periodo de tiempo.

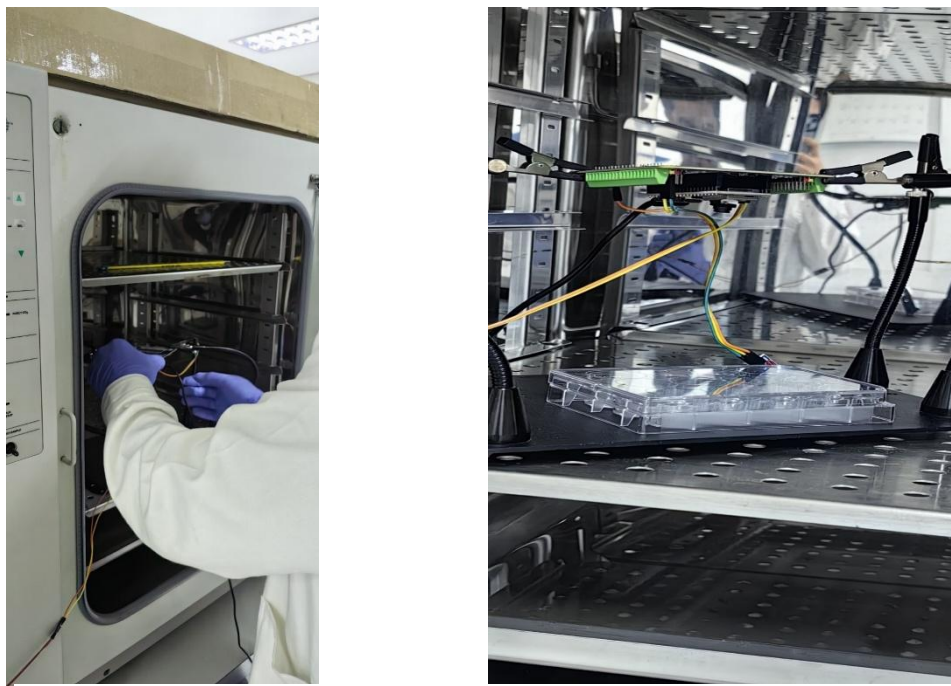


Figura 11. Validación de Sistema IOT en entorno controlado de Laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados Esperados

- Estabilidad: Funcionamiento continuo de 24 horas sin reinicios o fallos.
- Imágenes: 60 imágenes capturadas con calidad suficiente para observar células (sin distorsión, enfoque adecuado)
- Datos ambientales: Temperatura media de $37 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y humedad de $95 \pm 3\%$.
- Transmisión: 95% de los datos enviados a Ubidots® con latencia de $5 <$ segundos.
- Almacenamiento: Porcentaje de los datos guardados en SD.

Capítulo V. Desarrollo de Proyecto

Se revisaron microcontroladores de distintos fabricantes antes de programar los circuitos; se optó por una placa de desarrollo Freenove ESP32-S3-WROOM CAM Board (flash de 16 MB), microcontrolador de doble núcleo de 32 bits 240 MHz, cámara inalámbrica integrada, y una Placa de conexión Freenove para ESP32/ESP32-S3 WROVER WROOM, la cual incluía un escudo de bloque de terminales con cabezal de clavija, salidas de alimentación de 5 V y 3,3 V, y un LED de estado GPIO.

Se adquirió un sensor comercial DHT11, y se utilizó una cámara óptica con las siguientes características: Taidacent ESP32 - CAM ESP32CAM ESP32 CAM Wifi IP temporizador módulo de cámara web 3MP OV3660 160 grados YUV RGB 21mm 80mm FPC cable DVP interfaz (80mm FPC 68 grados).

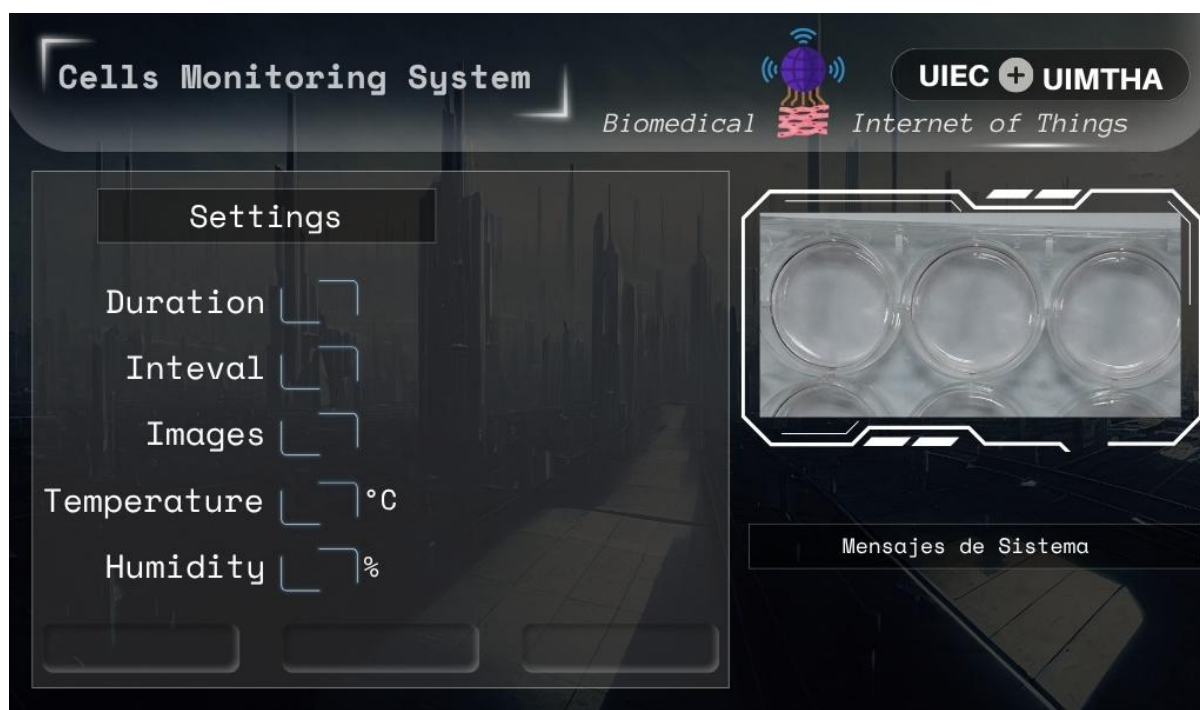


Figura 12. Diseño de Interfaz de Usuario HMI. Fuente: Elaboración propia.

Se desarrolló la interfaz humano-máquina Nextion® NX1060P101-011C-I mediante programación, incluyendo el diseño correspondiente de su interfaz de comunicación.



Figura 13. Implementación de Interfaz de Usuario HMI + ESP32-S3. Fuente: Elaboración propia.

La programación del firmware para la placa de desarrollo Freenove ESP32-S3-WROOM CAM Board se llevó a cabo en Arduino IDE® versión 2.3.6, empleando el lenguaje C++ y bibliotecas específicas para ESP32-CAM, DHT11, Wifi, SD y UART, y en Nextion Editor® versión 1.67 para el diseño y compilación de la interfaz HMI NX1060P101-011C-I.

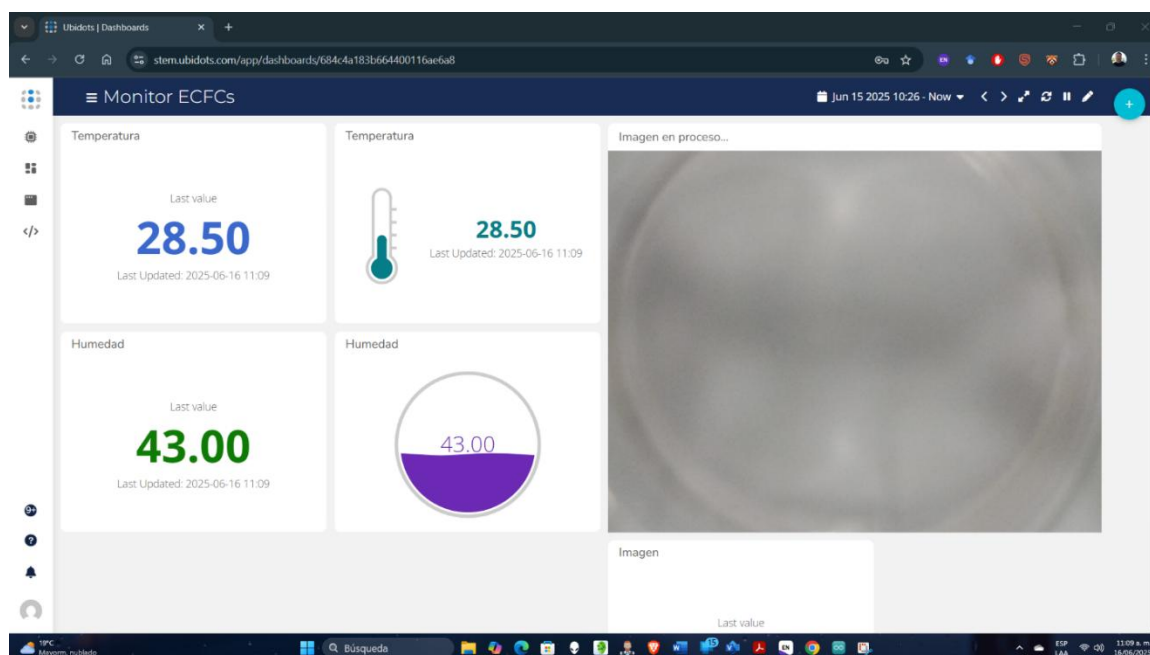


Figura 14. Dashboard IOT en la nube UBIDOTS. Fuente: Elaboración propia.

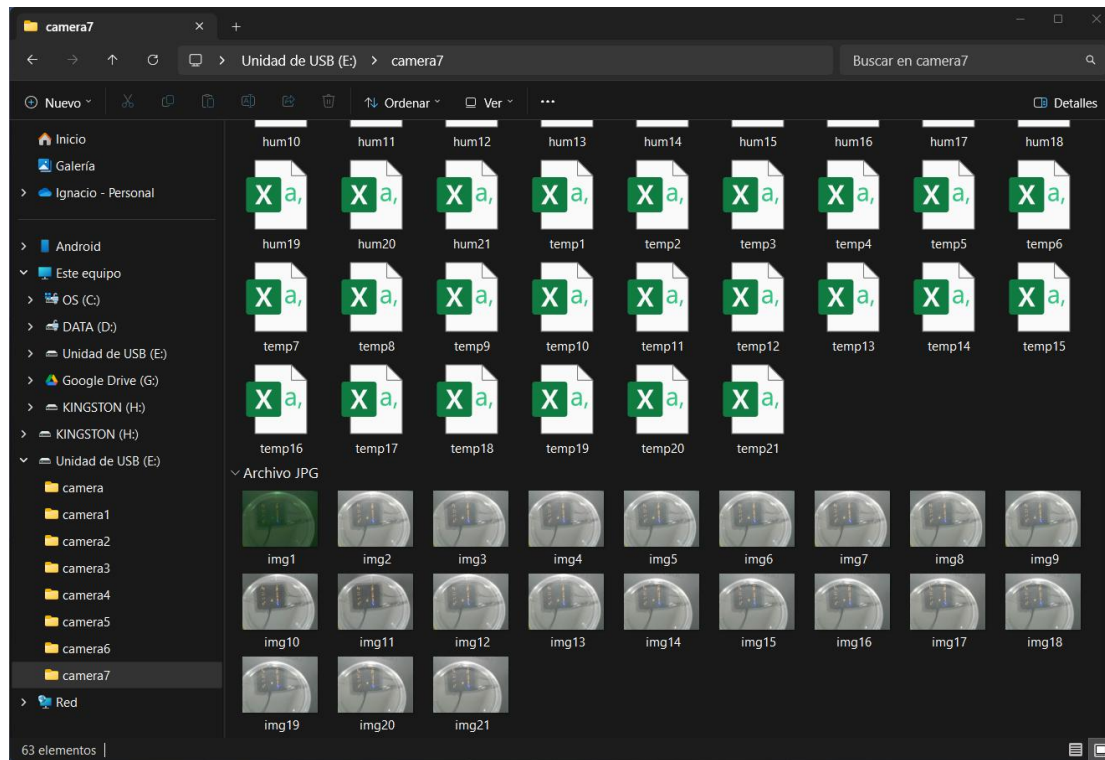


Figura 15. Repositorio de datos e imágenes en SD ESP32-S3. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo VI. Resultados

Los resultados de la prueba de concepto validaron la factibilidad técnica del sistema IOT para el monitoreo remoto de muestras celulares. La plataforma, integrada por un sensor óptico dedicado a la captura de imágenes, un sensor DHT11 para la caracterización ambiental, un microcontrolador ESP32-S3 como núcleo procesador y una interfaz HMI Nextion para la interacción usuario-sistema, exhibió un rendimiento sólido en la adquisición, procesamiento y transmisión confiable de datos hacia la plataforma Ubidots®. El sistema capturó, sincronizó y registró imágenes junto con los parámetros ambientales, corroborando el flujo *end-to-end* y sentando las bases para la validación clínica posterior del dispositivo.

Análisis de resultados

El firmware en ESP32-S3 en las pruebas fue capaz de leer los valores del sensor DHT11 en cuanto a temperatura y humedad; activar y configurar el módulo de cámara y establecer conexión a internet.

La calidad de las imágenes fue subjetivamente considerada buena por un experto, a reserva de ser procesadas en otra etapa del proyecto mediante algoritmos de visión por computadora.

Durante la fase de prueba, la tasa de éxito en cuanto a captura de imágenes fue de 85%, de lectura de datos del sensor DHT11 fue del 100%, de registro de datos en SD para su posterior análisis mediante VC fue del 90% y la transmisión a la plataforma Ubidots®, fue del 100%. Estos resultados destacan la robustez del sistema en la adquisición y transmisión de datos críticos, aunque sugieren la necesidad de optimizar los procesos de captura y almacenamiento local de imágenes para alcanzar una fiabilidad óptima en todas las funcionalidades.

La eficiencia en la captura de imágenes, si bien es satisfactoria, indica la necesidad de implementar mecanismos de reintento o buffers que minimicen la pérdida de datos visuales críticos, mientras que la alta fiabilidad en la lectura del DHT11 y la transmisión a Ubidots® valida la selección de componentes para monitoreo ambiental y conectividad en entornos controlados (Fauzi et al., 2023, p. 6; Gómez et al., 2018).

Al analizar los datos obtenidos, se encontró que la conexión a internet fue exitosa; asimismo, el enlace a la plataforma Ubidots® también fue exitoso en las pruebas. En cuanto a la inicialización de los sensores, se observó que: 1) La mala configuración en la calidad de las imágenes dio resultados negativos relacionados con la memoria del dispositivo. 2) La conexión física del dispositivo y los sensores así como los periféricos necesarios para la interacción humano-computadora (HMI) resultaron negativos en un 10% de los intentos.

La validación de la fiabilidad en la transmisión de datos, junto con la baja latencia observada, es consistente con hallazgos de sistemas similares que emplean microcontroladores ESP32 en aplicaciones de monitoreo en tiempo real (Jose et al., 2025). Adicionalmente, la integración exitosa de la interfaz HMI Nextion demostró la capacidad del sistema para facilitar la interacción intuitiva del usuario, lo cual es crucial para la adopción en entornos de laboratorio donde la usabilidad es tan importante como la precisión técnica (Addow et al., 2025, p. 11). Estos resultados iniciales sugieren que el prototipo tiene un gran potencial para la monitorización de cultivos celulares, aunque es imperativo abordar las deficiencias identificadas en la captura de imágenes para garantizar la integridad de los datos visuales.

Se alcanzó el objetivo de validación de concepto del Sistema IOT de Monitoreo en tiempo real de CFCE, se obtuvo un prototipo de monitoreo time-lapse mediante el módulo de cámara del ESP32-S3, la sincronización de lectura y registro en SD y su publicación en un dashboard o tablero de control a través del protocolo MQTT y la plataforma IOT Ubidots®. La estabilidad de la transmisión de datos a través de MQTT y la plataforma Ubidots® valida

la robustez del sistema en el mantenimiento de un monitoreo continuo y efectivo (Kalamaras et al., 2024). Para futuras iteraciones, la optimización de los algoritmos de compresión de imágenes y la implementación de un sistema de gestión de errores robusto para la recaptura de frames fallidos se consideran esenciales para elevar la integridad del conjunto de datos visuales (Canto-Vivanco et al., 2024, p. 87). Sin embargo, para una validación exhaustiva, es fundamental comparar las mediciones del sistema con instrumentos de referencia calibrados, tal como se sugiere en estudios de sistemas biomédicos similares (Becerra-Tapia et al., 2023, p. 7). Además, la evaluación de la calidad y estabilidad del servicio de conexión, incluyendo la gestión de intermitencias, es crucial para asegurar la integridad de los datos en un sistema IOT con infraestructura propia (Aguirre et al., 2022, p. 19).

- Factores críticos: Identificar limitaciones (como la calidad de imagen en condiciones de baja luz, o la estabilidad de Wifi dentro de la incubadora).

El dispositivo MCU ESP32-S3 Freenove® presentó estabilidad hasta el tercer modelo utilizado, puesto que en pruebas muy tempranas de implementación del firmware, se generaron confusiones en cuanto al desempeño. Fue hasta la tercera versión y con un MCU de mayor calidad y capacidad de almacenamiento que el firmware se ejecutó con un mínimo de incidentes. La selección de un microcontrolador con capacidades de procesamiento mejoradas y una conversión analógica-digital superior, como el ESP32, es crucial para optimizar el control de parámetros y asegurar la integridad de los datos en tiempo real (Baicu et al., 2024). Esta elección estratégica es fundamental para mitigar las fluctuaciones en la adquisición de datos y asegurar la consistencia en el monitoreo de los cultivos celulares. Asimismo, la optimización de la gestión energética para prolongar la autonomía operativa del dispositivo y su portabilidad representa un aspecto crítico a considerar en el diseño de futuras iteraciones, especialmente para aplicaciones de monitoreo continuo donde la movilidad es un factor determinante (Ballal, 2022, p. 235).

Un factor importante en este modelo es la configuración y control del módulo de cámara con ESP32-S3. Existen diferentes modelos comerciales de bajo costo en el mercado, pero difieren en calidad y desempeño. Este modelo fue probado con los modelos OV2640 y Taidacent ESP32—CAM de 3MP, así como con un modelo OV3660, el cual presentó estabilidad y funcionalidad para el prototipo. La evaluación comparativa de estos módulos de cámara subraya la importancia de seleccionar componentes que no solo sean rentables, sino que también cumplan con los requisitos de resolución y estabilidad necesarios para el análisis de imágenes en aplicaciones de cultivo celular, especialmente cuando se consideran algoritmos de visión por computadora para la cuantificación fenotípica.

-Validez para la investigación: ¿Las imágenes capturadas permiten observar el comportamiento celular? Para determinar si las imágenes obtenidas son adecuadas para el análisis del comportamiento celular, es fundamental evaluar la resolución espacial, el contraste y la fidelidad cromática, elementos que impactan directamente la capacidad de discernir estructuras subcelulares y eventos dinámicos como la proliferación o la morfología celular (Castleman, 1987; Skandarajah et al., 2014).

Se constató el registro de imágenes y datos medioambientales en un entorno controlado cuasi real. El objetivo alcanzado en este trabajo fue la implementación y validación de funciones básicas, como el censado de imágenes y datos de los sensores. Las imágenes fueron tomadas con luz ambiental y fuera de una incubadora. En este sentido, las imágenes obtenidas, a simple vista, pueden no permitir observar el comportamiento celular, lo cual deberá probarse y validarse en la siguiente fase del estudio. La integración de un sistema de iluminación controlada, posiblemente basado en técnicas avanzadas de imagen como la microscopía de fluorescencia o de contraste de fases, será crucial para mejorar la visibilidad de los detalles intracelulares y cuantificar dinámicas celulares específicas (Dietz et al., 2022; Landolfo et al., 2025; Torrente et al., 2025). Además, la selección de una cámara con la sensibilidad, resolución

y velocidad de fotogramas adecuadas es esencial para capturar con precisión las respuestas celulares lentas o estáticas (Branning et al., 2024, p. 15). Por ejemplo, la utilización de cámaras CMOS de alta velocidad, como las empleadas en la microscopía de campo oscuro y contraste de fases, permitiría la captura de fenómenos celulares dinámicos con una resolución temporal y espacial suficiente para el análisis de la motilidad y la interacción celular (Das & Zun, 2025; Vicentini et al., 2023, p. 8).

Recomendaciones: Mejoras para la siguiente iteración.

Así pues, la siguiente iteración en este proyecto de investigación y desarrollo de aplicaciones IOT en el ámbito de la biomedicina habrá de centrarse en la mejora de la captura de imágenes en un entorno real, con la implementación de luz infrarroja. La implementación de sensores más sofisticados para censar gases como oxígeno y presión, además de los ya obtenidos (humedad y temperatura). Asimismo, la incorporación de protocolos de etiquetado celular mediante agentes fluorescentes y la optimización de los algoritmos de procesamiento de imágenes para la detección y cuantificación de células muertas o la evaluación de la superficie ocupada serán fundamentales para obtener una caracterización más exhaustiva del cultivo celular (Naudot, 2013, p. 126).

Es de suma importancia recalcar que la próxima iteración es la implementación en PCB del circuito diseñado para un sistema IOT de monitoreo en tiempo real de cultivos celulares y el uso de cámaras más sofisticadas, de uso biomédico, así como filtros especializados y aumentos necesarios, junto con la programación de los controles necesarios desde el HMI para la configuración de todos los controles posibles del sensor óptico, enfoque, corrección de imagen, calidad de imagen, entre otros.

Siguientes pasos

- Mejora de la cámara: Reemplazar el sensor OV3660 por una cámara de mayor resolución o con mejor sensibilidad a la luz.
- Implementar emisores IR para pruebas en entornos reales (incubadora oscura)
- Sensores adicionales: incluir pH, CO₂, etc.
- Optimización de energía: Para permitir monitoreo prolongado con batería.
- Análisis de imágenes en el borde: Implementar algoritmos de procesamiento de imágenes en el ESP32 para análisis básico (ej., conteo celular)
- Integración con software de análisis: Conectar Ubidots® con herramientas de análisis de imágenes (ej., Python, ImageJ).
- Pruebas con diferentes líneas celulares y estímulos.

Desafíos

- **Seguridad de datos:** Vulnerabilidad en transmisión inalámbrica (solución: encriptación AES-256 (Qaddoori et al., 2023)).
- **Estandarización:** Falta de protocolos unificados para interoperabilidad entre dispositivos (Asier et al., 2019) (Initiative: IEEE P2145).
- **Escalabilidad:** Altos costos en implementación industrial (solución: sensores impresos en 3D de bajo costo)(Orozco, 2024).

Capítulo VII. Conclusiones y Recomendaciones

El prototipo del sistema IOT para el monitoreo time-lapse en tiempo real de cultivos celulares demostró su viabilidad y factibilidad en la fase preliminar de validación conceptual; los componentes de bajo costo empleados resultaron suficientes para corroborar la viabilidad técnica y las funciones básicas iniciales del sistema propuesto.

Los componentes comerciales como sensores, cámaras y dispositivos son de calidad variable. Se debe prestar atención a la documentación de acceso libre de cada elemento; tanto el software como el hardware libres presentan pros y contras. Los principales beneficios son el fácil acceso y libre uso y distribución, pero, como contrapartida, es la diversidad de documentación no estandarizada.

La democratización en cuanto a acceso a componentes y electrónica trae consigo falta de estandarización y documentación que puede frenar los desarrollos tecnológicos; se recomienda identificar costo-beneficio de componentes como placas de desarrollo y sensores; un ejemplo de ello es el caso anecdótico en la búsqueda y elección de módulos de sensores ópticos para este proyecto.

Se probaron varios módulos y SOC's. Factores mínimos como las dimensiones y la extensión de los cables pusieron en riesgo o no fueron aptos para el propósito y objetivo que se visualizaba; es recomendable considerar la documentación y las características físicas y técnicas de los componentes en la planeación de proyectos.

La tendencia en el momento histórico actual apunta hacia el monitoreo remoto aplicado a la salud. El caso que nos ocupa tiene potencial de desarrollo y aplicaciones futuras, es pertinente la dedicación al desarrollo de líneas de investigación en este sentido para el beneficio de nuestra sociedad.

Anexos.

Anexo 1. Instrumento de Evaluación de Usabilidad (SUS)

EVALUACIÓN DE USABILIDAD HMI

PARA SEGUIMIENTO DE CFCE CON IOT

Ignacio Pineda del Aguila, José Antonio Alvarado Moreno

HOJA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Nombre:		Fecha		Folio
Edad:	Sexo: ☐ Hombre ☐ Mujer			
Escolaridad	☐ Preparatoria/Carrera Técnica ☐ Universidad ☐ Posgrado			

ESCALA DE USABILIDAD DE SISTEMAS "B"

Por favor después de inspeccionar el material, marque con una X dentro del círculo la opción que más que usted considere

	Totalmente en desacuerdo				Totalmente de acuerdo
1.- Creo que me gustaría utilizar frecuentemente este sistema	☐	☐	☐	☐	☐
2.- Encontré el sistema sencillo	☐	☐	☐	☐	☐
3.- Pienso que el sistema es fácil de usar	☐	☐	☐	☐	☐
4.- Creo que podré utilizar esta aplicación sin el apoyo de personal técnico	☐	☐	☐	☐	☐
5.- Encontré que varias funciones en el sistema estaban bien integradas	☐	☐	☐	☐	☐
6.- Pensé que había demasiada consistencia en el sistema	☐	☐	☐	☐	☐
7.- Me imagino que la mayoría de las personas podrían aprender a usar este sistema muy rápido	☐	☐	☐	☐	☐
8.- Encontré al sistema muy intuitivo	☐	☐	☐	☐	☐
9.- Me sentí muy confiado(seguro) al utilizar este sistema	☐	☐	☐	☐	☐
10.- Pude utilizar la aplicación sin tener que aprender nada nuevo	☐	☐	☐	☐	☐

Observaciones generales:

Anexo 2. Código Fuente Sistema Embebido Sistema IOT

Anexo 2. Código Fuente sistema embebido

```
#include "Nextion.h"
#include "esp_camera.h"
#define CAMERA_MODEL_ESP32S3_EYE
#include "camera_pins.h"
#include "ws2812.h"
#include "sd_read_write.h"

#include "HardwareSerial.h"
#include <DHT.h>

// Configuración de sensor DHT11 y luz de aviso
// #define LED_BUILTIN 2
#define DHTPIN 4
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

int X = 1;

NexText p0_t0 = NexText(0, 10, "t0"); // Mensajes al usuario

NexButton p0_b0 = NexButton(0, 5, "b0"); // Botón inicio de proceso
NexButton p0_b1 = NexButton(0, 11, "b1"); // Botón para visualizar repositorio
NexButton p0_b2 = NexButton(0, 12, "b2"); // Botón para dormir dispositivo

NexNumber p0_n0 = NexNumber(0, 5, "n0"); // Duración en minutos
NexNumber p0_n1 = NexNumber(0, 6, "n1"); // Intervalo
NexNumber p0_n2 = NexNumber(0, 7, "n2"); // Numero de Imágenes a tomar

NexNumber p0_n3 = NexNumber(0, 8, "n3"); // Temperatura
NexNumber p0_n4 = NexNumber(0, 9, "n4"); // Humedad

NexTouch *nex_listen_list[] = { &p0_b0, &p0_b1, &p0_b2, NULL };

String captureDir; // Variable global para almacenar el directorio de captura

bool dirExists(const char* path) {
    bool exists = false;
    File file = SD_MMC.open(path);
    if (file) {
        exists = file.isDirectory();
        file.close();
    }
    return exists;
}

// Función para crear un nuevo directorio de captura
```

```

String createNewCaptureDir() {
    if (!SD_MMC.begin()) {
        Serial.println("Error al montar SD");
        return "";
    }

    // Crear directorio base si no existe
    if (!dirExists("/camera")) {
        createDir(SD_MMC, "/camera");
        Serial.println("Directorio base creado: /camera");
    }

    int maxNumber = 0;
    File root = SD_MMC.open("/");
    File file = root.openNextFile();

    while (file) {
        if (file.isDirectory()) {
            String dirName = file.name();
            // Buscar directorios que empiecen con "camera" seguido de números
            if (dirName.startsWith("camera")) {
                // Ignorar el directorio base "camera" (longitud exacta 6)
                if (dirName.length() > 6) {
                    String numStr = dirName.substring(6); // Extraer parte numérica
                    bool isNumber = true;
                    for (unsigned int i = 0; i < numStr.length(); i++) {
                        if (!isdigit(numStr.charAt(i))) {
                            isNumber = false;
                            break;
                        }
                    }
                    if (isNumber && numStr.length() > 0) {
                        int num = numStr.toInt();
                        if (num > maxNumber) maxNumber = num;
                    }
                }
            }
            file = root.openNextFile();
        }
    }

    String newDir = "/camera" + String(maxNumber + 1);
    createDir(SD_MMC, newDir.c_str());
    Serial.print("Nuevo directorio: ");
    Serial.println(newDir);
    return newDir;
}

```

```

// Función para enviar datos a UBIDOTS (comentada)
/*
void sendToUbidots(int counter, float temp, float hum) {
    // Crear objeto JSON
    String jsonData = "{";
    jsonData += "\"counter\":" + String(counter) + ",";
    jsonData += "\"temperature\":" + String(temp) + ",";
    jsonData += "\"humidity\":" + String(hum);
    jsonData += "}";

    // Aquí iría el código para enviar jsonData a UBIDOTS
    Serial.println("Enviando a UBIDOTS: " + jsonData);
}
*/

// Handler mejorado para el botón de inicio
void p0_b0_Release(void *ptr) {
    uint32_t n1_value, n2_value;
    p0_n1.getValue(&n1_value); // Intervalo en segundos
    p0_n2.getValue(&n2_value); // Número de imágenes

    p0_t0.setText("Espera 10 seg...");
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    delay(10000); // Espera inicial de 10 segundos

    // Crear nueva carpeta para este ciclo
    captureDir = createNewCaptureDir();
    if (captureDir == "") {
        p0_t0.setText("Error creando carpeta");
        //digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
        return;
    }

    // Ciclo principal de monitoreo
    for (int i = 1; i <= n2_value; i++) {
        unsigned long startTime = millis(); // Tiempo de inicio del ciclo

        // Actualizar texto en pantalla
        char msg[50];
        sprintf(msg, "Registrando imagen: %d", i);
        p0_t0.setText(msg);

        // Capturar imagen
        camera_fb_t *fb = esp_camera_fb_get();
        if (!fb) {
            Serial.println("Error en captura de cámara");
            p0_t0.setText("Error cámara");
            continue;
        }
    }
}

```

```

}

// Leer sensores
float temperature = dht.readTemperature();
float humidity = dht.readHumidity();

// Actualizar variables en pantalla
p0_n3.setValue(static_cast<int>(temperature));
p0_n4.setValue(static_cast<int>(humidity));

// Formar nombres de archivo
String imagePath = captureDir + "/img" + String(i) + ".jpg";
String tempPath = captureDir + "/temp" + String(i) + ".csv";
String humPath = captureDir + "/hum" + String(i) + ".csv";

// Guardar imagen
File imgFile = SD_MMC.open(imagePath.c_str(), FILE_WRITE);
if (imgFile) {
  imgFile.write(fb->buf, fb->len);
  imgFile.close();
  Serial.println("Imagen guardada: " + imagePath);
} else {
  Serial.println("Error guardando imagen");
}
esp_camera_fb_return(fb);

// Guardar temperatura en CSV
File tempFile = SD_MMC.open(tempPath.c_str(), FILE_WRITE);
if (tempFile) {
  tempFile.println(temperature);
  tempFile.close();
  Serial.println("Temp guardada: " + String(temperature));
}

// Guardar humedad en CSV
File humFile = SD_MMC.open(humPath.c_str(), FILE_WRITE);
if (humFile) {
  humFile.println(humidity);
  humFile.close();
  Serial.println("Hum guardada: " + String(humidity));
}

// Envío a UBIDOTS (comentado)
// sendToUbidots(i, temperature, humidity);

// Control de intervalo
unsigned long elapsedTime = millis() - startTime;
uint32_t waitTime = n1_value * 1000; // Convertir segundos a ms

```

```

    // Esperar tiempo restante si es necesario
    if (elapsedTime < waitTime) {
        delay(waitTime - elapsedTime);
    }
}

// Finalización del proceso
p0_t0.setText("Proceso finalizado");
// digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);

// Reiniciar contadores para nuevo ciclo
X = 1;
}

// Resto de handlers sin cambios
void p0_b1_Release(void *ptr) {
    // digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    p0_t0.setText("Apagado");
}

void p0_b2_Release(void *ptr) {
    // digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    p0_t0.setText("A descansar");
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.setDebugOutput(false);
    Serial.println();
    ws2812Init();
    sdmmcInit();

    // pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
    dht.begin();
    nexInit();

    delay(1000);

    // Asignar handlers a botones
    p0_b0.attachPush(p0_b0_Release, &p0_b0);
    p0_b1.attachPush(p0_b1_Release, &p0_b1);
    p0_b2.attachPush(p0_b2_Release, &p0_b2);

    p0_t0.setText("¿Que hacemos?");

    // Inicializar cámara
    if(cameraSetup() == 1) {

```

```

// ws2812SetColor(2); // Luz verde: cámara lista
} else {
// ws2812SetColor(1); // Luz roja: error cámara
return;
}
}

void loop() {
  delay(5000);

  // Leer sensores
  float humidity = dht.readHumidity();
  float temperature = dht.readTemperature();

  if (isnan(humidity) || isnan(temperature)) {
    Serial.println("Error: No se pudo leer el sensor!");
    return;
  }

  // Actualizar interfaz
  nexLoop(nex_listen_list);

  // Mostrar valores en consola
  Serial.print("Temperature = ");
  Serial.print(temperature);
  Serial.println(" °C");
  Serial.print("Humidity = ");
  Serial.print(humidity);
  Serial.println(" %");
  Serial.println(".....");

  // Actualizar pantalla Nextion
  p0_n3.setValue(static_cast<int>(temperature));
  p0_n4.setValue(static_cast<int>(humidity));
}

int cameraSetup(void) {
  camera_config_t config;
  config.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0;
  config.ledc_timer = LEDC_TIMER_0;
  config.pin_d0 = Y2_GPIO_NUM;
  config.pin_d1 = Y3_GPIO_NUM;
  config.pin_d2 = Y4_GPIO_NUM;
  config.pin_d3 = Y5_GPIO_NUM;
  config.pin_d4 = Y6_GPIO_NUM;
  config.pin_d5 = Y7_GPIO_NUM;
  config.pin_d6 = Y8_GPIO_NUM;
  config.pin_d7 = Y9_GPIO_NUM;

```

```

config.pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM;
config.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM;
config.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM;
config.pin_href = HREF_GPIO_NUM;
config.pin_sccb_sda = SIOD_GPIO_NUM;
config.pin_sccb_scl = SIOC_GPIO_NUM;
config.pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM;
config.pin_reset = RESET_GPIO_NUM;
config.xclk_freq_hz = 10000000;
config.frame_size = FRAMESIZE_UXGA; //UXGA originalmente
config.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG;
config.grab_mode = CAMERA_GRAB_WHEN_EMPTY;
config.fb_location = CAMERA_FB_IN_PSRAM;
config.jpeg_quality = 1;
config.fb_count = 1;

// Configuración mejorada si hay PSRAM
if(psramFound()){
    config.jpeg_quality = 10;
    config.fb_count = 2;
    config.grab_mode = CAMERA_GRAB_LATEST;
} else {
    config.frame_size = FRAMESIZE_HD; //SVGA original
    config.fb_location = CAMERA_FB_IN_DRAM;
}

// Inicializar cámara
esp_err_t err = esp_camera_init(&config);
if (err != ESP_OK) {
    Serial.printf("Camera init failed with error 0x%x", err);
    return 0;
}

// Configurar parámetros del sensor
sensor_t * s = esp_camera_sensor_get();
s->set_vflip(s, 1); // Volteo vertical
s->set_brightness(s, 1); // Brillo moderado
s->set_saturation(s, 0); // Saturación normal

Serial.println("Camera configuration complete!");
return 1;
}

```

References

- Abuarqoub, D., & Mutahar, M. (2025). The Application of Artificial Intelligence (AI) in Regenerative Medicine: Current Insights and Challenges. *BioMedInformatics*, 5(4), 69-69. <https://doi.org/10.3390/biomedinformatics5040069>
- Addam, M., Haddadi, A. E., & Heyouni, M. (2019). Proceeding of the 12th edition of Numerical Analysis and Optimization Days. *HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe)*. <https://hal.science/hal-03214215>
- Addow, M. A., Jimale, A. D., Nageye, A. Y., Abdullahi, M. O., & Hilowle, S. M. (2025). A low-cost IoT-based smart home automation system for urban sustainability in Mogadishu, Somalia. *Discover Internet of Things*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00207-4>
- Aguilar, M. I. H., & Villegas, A. A. G. (2016). Análisis comparativo de la Escala de Usabilidad del Sistema (EUS) en dos versiones / Comparative analysis of the System Usability Scale (SUS) in two versions. *RECI Revista Iberoamericana de las Ciencias Computacionales e Informática*, 5(10), 44-44. <https://doi.org/10.23913/reci.v5i10.48>
- Aguirre, E. A., Torres, L. E., Romero, L. C., Holguín, E. P., & Ferro, R. (2022). Modelo para la implementación de una plataforma de IoT para el conocimiento del riesgo. *Ingeniería y Competitividad*, 24(2), 11-11. <https://doi.org/10.25100/iyv.v24i02.11356>
- Alali, M., Vianna, L. C., Lucas, R. A. I., Junejo, R. T., & Fisher, J. P. (2020). Impact of whole body passive heat stress and arterial shear rate modification on radial artery function in young men. *Journal of Applied Physiology*, 129(6), 1373-1382. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00296.2020>
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2001). Blood Vessels and Endothelial Cells. *31*(6), 301-303.
- Alia, C., Cangi, D., Massa, V., Salluzzo, M., Vignozzi, L., Caleo, M., & Spalletti, C. (2021). Cell-to-Cell Interactions Mediating Functional Recovery after Stroke. *Cells*, 10(11), 3050-3050. <https://doi.org/10.3390/cells10113050>
- Ambrosino, P., Grassi, G., & Maniscalco, M. (2021). Endothelial Dysfunction: From a Pathophysiological Mechanism to a Potential Therapeutic Target. *Biomedicines*, 10(1), 78-78. <https://doi.org/10.3390/biomedicines10010078>
- Ananikov, V. P. (2024). Top 20 influential AI-based technologies in chemistry. *Artificial Intelligence Chemistry*, 2(2), 100075-100075. <https://doi.org/10.1016/j.aichem.2024.100075>
- Andrade, C. A. D., Isabella, G. R., & Caicedo, N. H. (2025). Implementación de una mini-columna de burbujeo con sistemas de monitoreo y control apoyado en IoT para el estudio de cultivos de levaduras. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*, 1-8. <https://doi.org/10.26507/paper.4760>
- Angarita, D. F. C., & Hidalgo, A. E. M. (2020). Sistema de monitoreo remoto de variables medioambientales en las salas de cirugía de una clínica de cuarto nivel de complejidad mediante el uso de internet de las cosas (IoT).
- Asier, C. M., Ramón, G. M., José, & Rafael, T. C. (2019). Diseño e implementación de un middleware CoAP-MQTT-HTTP para la mejora de la interoperabilidad de los protocolos de aplicación en redes IoT.
- Avci, M. B., Kurul, F., Türkan, M., & Çetin, A. E. (2025). Automated smartphone based cell analysis platform. *npj Imaging*, 3(1), 53-53. <https://doi.org/10.1038/s44303-025-00093-z>
- Azad, A. (2020). Design and Development of Remote Laboratories with Internet of Things Setting. *Advances in Internet of Things*, 11(3), 95-112.
- Baicu, L., Andrei, M., Ifrim, G., & Dimitrievici, L. T. (2024). Embedded IoT Design for Bioreactor Sensor Integration. *Sensors*, 24(20), 6587-6587. <https://doi.org/10.3390/s24206587>
- Baker, M. (2010). Taking a long, hard look. *Nature*, 466(7310), 1137-1138. <https://doi.org/10.1038/4661137a>

- Ballal, K. D. (2022). Evaluation of Cellular IoT Technologies for Critical Applications. *Research Portal Denmark*, 186.
- Batkamwar, A., Bobade, P., chaure, T., Chitke, A., & Kodgire, D. D. (2023). Lab Automation. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(12), 542-545.
- Baumgartner-Parzer, S. M., & Waldhäusl, W. K. (2001). The endothelium as a metabolic and endocrine organ: its relation with insulin resistance. *Exp Clin Endocrinol Diabetes*, 109 Suppl 2, S166-179. <https://doi.org/10.1055/s-2001-18579>
- Becerra-Tapia, V., Téllez-Victoria, V., Medina, J. M. R., Peñaloza-Mendoza, G. R., & Castro-Zenil, M. S. (2023). Sistema de transferencia de datos biomédicos con protocolos de comunicación de bajo consumo. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 6(4). <https://doi.org/10.37636/recit.v6n4e284>
- Beddingfield, D. H., Nordquist, H., & Umebayaashi, E. (2009). Implementation of remove monitoring in facilities under safeguards with unattended systems. *OSTI OAI (U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information)*. <https://www.osti.gov/biblio/989814>
- Branning, J. M., Faughnan, K. A., Tomson, A. A., Bell, G., Isbell, S. M., deGroot, A. W., Jameson, L. C., Kilroy, K., Smith, M. C., Smith, R., Mottel, L., Branning, E. G., Worrall, Z., Anderson, F., Panditaradyula, A., Yang, W., Abdelmalek, J. A., Brake, J., & Cash, K. J. (2024). Multifunction fluorescence open source in vivo/in vitro imaging system (openIVIS). *PLOS ONE*, 19(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299875>
- Brooke, J. (1996). SUS: A 'Quick and Dirty' Usability Scale. In (pp. 207-212). <https://doi.org/10.1201/9781498710411-35>
- Cano, F., Gajardo, M., & Freundlich, M. (2020). Eje Renina Angiotensina, Enzima Convertidora de Angiotensina 2 y Coronavirus/ Renin Angiotensin Axis, Angiotensin Converting Enzyme 2 and Coronavirus. 91(3), 330-338. https://www.scielo.cl/pdf/rcp/v91n3/en_0370-4106-rcp-rchped-vi91i3-2548.pdf
- Canto-Vivanco, E. E., Ramos-Cosi, S., Romero-Alva, V., Vargas-Cuentas, N. I., & Roman-Gonzalez, A. (2024). Development of a payload for monitoring biological samples in microgravity and hypergravity conditions. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 35(1), 78-78. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v35.i1.pp78-89>
- Capuzzo, A. M., Pasqua, S., Vigo, D., Gazzola, D., Curone, G., & Brecchia, G. (2020). MICROFLUIDIC LIVE-IMAGING WITH CELLVIEWER TECHNOLOGY TO PERFORM BIOTECHNOLOGICAL TASKS. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 5(6), 27-34. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2020.v05i06.005>
- Carvajal, C. C. (2017). EL ENDOTELIO: ESTRUCTURA, FUNCIÓN Y DISFUNCIÓN ENDOTELIAL. *Medicina Legal de Costa Rica*, 34(2), 90-100. <https://pesquisa.bvsalud.org/porta/resource/pt/biblio-894325>
- Castleman, K. R. (1987). Spatial and photometric resolution and calibration requirements for cell image analysis instruments. *Applied Optics*, 26(16), 3338-3338. <https://doi.org/10.1364/ao.26.003338>
- Castro, J., & Araújo, N. (2020). Impact of the Fourth Industrial Revolution on the Health Sector: A Qualitative Study. *Healthcare Informatics Research*, 26(4), 328-334. <https://doi.org/10.4258/hir.2020.26.4.328>
- Ceccherini-Nelli, L., & Matteoli, B. (2012). *Biomedical Tissue Culture*. <https://doi.org/10.5772/3071>
- Çetin, A. E. (2023). A portable and low-cost incubator system enabling real-time cell imaging based on a smartphone. *TURKISH JOURNAL OF PHYSICS*, 47(5), 279-296. <https://doi.org/10.55730/1300-0101.2749>
- Colombia, U. d. I. L., Vargas, J. L., Cuero, J., Colombia, U. d. I. L., Torres, C., & Colombia, U. d. I. L. (2020). Laboratorios Remotos e IOT una oportunidad para la formación en ciencias e ingeniería en tiempos del COVID-19: Caso de Estudio en Ingeniería de Control. *ESPACIOS*, 41(42).
- Das, S., & Zun, P. (2025). Introduction to a Low-Cost AI-Powered GUI for Unstained Cell Culture Analysis. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2509.11354>
- Deshpande, D., Janero, D. R., Segura-Ibarra, V., Blanco, E., & Amiji, M. M. (2016). Nucleic Acid Delivery for Endothelial Dysfunction in Cardiovascular Diseases. In (Vol. 12, pp. 134-134).

- Dessalles, C. A., Leclech, C., Castagnino, A., & Barakat, A. I. (2021). Integration of substrate- and flow-derived stresses in endothelial cell mechanobiology. In (Vol. 4): Nature Portfolio.
- Dietz, H. G., Abney, D., Eberhart, P., Santini, N., Davis, W., Wilson, E., & McKenzie, M. (2022). ESP32-CAM as a programmable camera research platform. *Electronic Imaging*, 34(7), 232-231. <https://doi.org/10.2352/ei.2022.34.7.iss-232>
- Ding, S., Huang, J., Guo, C., Zhang, C., Xu, M., & Yang, J. (2015). Real-time bioluminescence imaging of endothelial colony-forming cells in vivo. *American Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 6(2), 101-101.
- Dios, R. R. d., Salaya, L. D. A., Vázquez, K. A., Cruz, N. G., & Pimienta, A. R. U. (2026). Creación de un sistema de información sobre cultivos apoyado en Inteligencia Artificial e IOT. *IPSUMTEC.*, 9(1), 51-59. <https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v9i1.450>
- Doulgkeroglou, M.-N., Nubila, A. D., Nießing, B., König, N., Schmitt, R., Damen, J., Szilvassy, S. J., Chang, W. Y., Csontos, L., Louis, S. A., Kugelmeier, P., Ronfard, V., Bayon, Y., & Zeugolis, D. I. (2020). Automation, Monitoring, and Standardization of Cell Product Manufacturing. In (Vol. 8): Frontiers Media.
- Drotth, A., & Alatia, S. (2016). Using Open Source for Rapid Prototyping of Proprietary Systems. *Malmö University Publications (Malmö University)*. <http://hdl.handle.net/2043/22405>
- Duru, J., Maurer, B., Ruff, T., Vulić, K., Hengsteler, J., Girardin, S., Vörös, J., & Ihle, S. J. (2024). A modular and flexible open source cell incubator system for mobile and stationary use. *HardwareX*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00571>
- Eggerschwiler, B., Canepa, D. D., Pape, H. C., Casanova, E. A., & Cinelli, P. (2019). Automated digital image quantification of histological staining for the analysis of the trilineage differentiation potential of mesenchymal stem cells. *Stem Cell Research & Therapy*, 10(1), 69-69. <https://doi.org/10.1186/s13287-019-1170-8>
- Elias, J. R., Chard, R., Libera, J. A., Foster, I., & Chaudhuri, S. (2020). The Manufacturing Data and Machine Learning Platform: Enabling Real-time Monitoring and Control of Scientific Experiments via IoT. 1-2. <https://doi.org/10.1109/wf-iot48130.2020.9221078>
- Fang, Y., Wu, D., & Birukov, K. G. (2019). Mechanosensing and Mechanoregulation of Endothelial Cell Functions. In (pp. 873-904): Wiley.
- Faris, P., Negri, S., Perna, A., Rosti, V., Guerra, G., & Moccia, F. (2020). Therapeutic potential of endothelial colony-forming cells in ischemic disease: strategies to improve their regenerative efficacy. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(19), 7406.
- Fauzi, M., Hidayat, R., & Hidayat, T. (2023). STORAGE ROOM TEMPERATURE AND HUMIDITY MONITORING IOT- BASED MEDICINE. *TEKNOKOM*, 6(2), 78-85. <https://doi.org/10.31943/teknokom.v6i2.135>
- Ferreira, G. H. C., & Júnior, M. F. (2023). Influência do uso de fármacos na regressão da placa aterosclerótica. *Revista Eletrônica Acervo Saúde*, 23(5). <https://doi.org/10.25248/reas.e12682.2023>
- Ficili, I., Giacobbe, M., Tricomi, G., & Puliafito, A. (2025). From Sensors to Data Intelligence: Leveraging IoT, Cloud, and Edge Computing with AI. *Sensors*, 25(6), 1763-1763. <https://doi.org/10.3390/s25061763>
- Filho, M. R., Islabão, G. I. d., & Santos, D. A. (2023). Aplicação do Paradigma “Internet das Coisas” para o Setor de Serviços e Cuidados com a Saúde: caminhos e desafios de desenvolvimento do setor a partir de análise patentária. *Cadernos de Prospecção*, 17(1), 287-299.
- Fodor, A., Tiperciuc, B., Login, C., Orășan, O., Lazăr, A.-L., Buchman, C., Hanghiceș, P., Sitar-Tăut, A., Suharoschi, R., Vultur, R., & Cozma, A. (2021). Endothelial Dysfunction, Inflammation, and Oxidative Stress in COVID-19—Mechanisms and Therapeutic Targets. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021(1), 8671713-8671713. <https://doi.org/10.1155/2021/8671713>
- Forslid, G., Wieslander, H., Bengtsson, E., Wählby, C., Hirsch, J. M., Stark, C., & Sadanandan, S. K. (2017). Deep Convolutional Neural Networks for Detecting Cellular Changes Due to Malignancy. 82-89. <https://doi.org/10.1109/iccvw.2017.18>

- Frati-Munari, A. C. (2013). Importancia médica del glucocáliz endotelial. *Archivos de cardiología de México*, 83(4), 303-312.
- Geraghty, R. J., Capes-Davis, A., Davis, J. M., Downward, J., Freshney, R. I., Knežević, I., Lovell-Badge, R., Masters, J. R., Meredith, J., Stacey, G., Thraves, P., & Vias, M. (2014). Guidelines for the use of cell lines in biomedical research. *British Journal of Cancer*, 111(6), 1021-1046. <https://doi.org/10.1038/bjc.2014.166>
- Gómez, J. E., Castaño, S., Mercado, T., Fernandez, A., & García, J. C. A. (2018). Sistema de internet de las cosas (IoT) para el monitoreo de cultivos protegidos. *Ingeniería e innovación*, 5(1). <https://doi.org/10.21897/23460466.1101>
- Gowder, S. J. T. (2017). *New Insights into Cell Culture Technology*.
- Grigoryeva, N. Y. (2020). *Fluorescence Methods for Investigation of Living Cells and Microorganisms*. IntechOpen.
- Grishagin, I. (2014). Automatic cell counting with ImageJ. *Analytical Biochemistry*, 473, 63-65. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2014.12.007>
- Gu, S. X., Tyagi, T., Jain, K., Gu, V. W., Lee, S. H., Hwa, J. M., Kwan, J. M., Krause, D. S., Lee, A. I., Halene, S., Martin, K. A., Chun, H. J., & Hwa, J. (2020). Thrombocytopathy and endotheliopathy: crucial contributors to COVID-19 thromboinflammation. *Nature Reviews Cardiology*, 18(3), 194-209. <https://doi.org/10.1038/s41569-020-00469-1>
- Guez, J. S., Lacroix, P.-Y., Château, T., & Vial, C. (2023). Deep in situ microscopy for real-time analysis of mammalian cell populations in bioreactors. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48733-x>
- Hejazi, H., Rajab, H., Cinkler, T., & Lengyel, L. (2017). Survey of platforms for massive IoT. 1-8.
- Henn, A. D., Pereira, T., Hunsberger, J., Mitra, K., Izadifar, Z., Somara, S., Lindström, L., Farb-Horch, T. F., Boy, J., Muschler, G. F., Bauer, S. R., & Yerden, R. (2023). Cytocentric measurement for regenerative medicine. *Frontiers in Medical Technology*, 5, 1154653-1154653. <https://doi.org/10.3389/fmedt.2023.1154653>
- Herendy, C. (2017). How to Research Website Usability and User Experience in Public Administration Websites. *Repository of the Academy's Library (Library of the Hungarian Academy of Sciences)*, 5(3).
- Hernández, C. L. H., Avalos, A. A., & Carrizo, D. (2022). Diseño de prototipo para enchufe inteligente de propósito general. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 30(3), 429-438. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052022000300429>
- Isosalo, A., Islam, J., Mustonen, H., Räninä, E., Inkinen, S. I., Brix, M., Kumar, T., Reponen, J., Nieminen, M. T., & Harjula, E. (2023). Local edge computing for radiological image reconstruction and computer-assisted detection: A feasibility study. *Finnish Journal of eHealth and eWelfare*, 15(1). <https://doi.org/10.23996/fjhw.122647>
- Jana, A., Mekhileri, N. V., Boyreau, A., Bazin, A., Pujol, N., Alessandri, K., Recher, G., Nassoy, P., & Badon, A. (2025). zIncuboscope: Long-term quantitative imaging of multi-cellular assemblies inside an incubator. *PLOS ONE*, 20(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309035>
- Jarrige, M. (2023). Cell Therapy for skin replacement : Study of the molecular mechanisms involved in the production of human skin reconstructed from pluripotent stem cell. *HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe)*.
- Jose, N., Raposo, A. A. M., & Sá, F. (2025). IoT-based Real-time Temperature Monitoring in Critical Systems: A Review. *IgMin Research*, 3(5), 226-234. <https://doi.org/10.61927/igmin303>
- Kalamaras, S. D., Tsitsimpikou, M.-A., Tzenos, C. A., Lithourgidis, A. A., Pitsikoglou, D. S., & Kotsopoulos, T. A. (2024). A Low-Cost IoT System Based on the ESP32 Microcontroller for Efficient Monitoring of a Pilot Anaerobic Biogas Reactor. *Applied Sciences*, 15(1), 34-34.
- Khamees, M., Mishkhal, I., & Saleh, H. H. (2021). Enhancing the Accuracy of Health Care Internet of Medical Things in Real Time using CNNets. *Iraqi Journal of Science*, 4158-4170. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2021.62.11.34>

- Klein, S. G., Alsolami, S., Arossa, S., Ramos-Mandujano, G., Parry, A. J., Steckbauer, A., Duarte, C. M., & Li, M. (2022). In situ monitoring reveals cellular environmental instabilities in human pluripotent stem cell culture. *Communications Biology*, 5(1), 119-119. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03065-w>
- Lam, C. C. (2020). Journey through quantitative haematology. *Hong Kong Medical Journal*, 26(6), 556-557.
- Landolfo, M., Perotti, F., Pistillo, A., Pennisi, G., Gianquinto, G., & Orsini, F. (2025). Optimizing artificial lighting for convolutional neural network-based crop monitoring with low-cost RGB imaging in indoor cultivation. *Smart Agricultural Technology*, 13, 101677-101677. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101677>
- Lee, J., Anjos, E., & Satti, S. R. (2020). SJSON: A succinct representation for JSON documents. *Information Systems*, 97, 101686-101686. <https://doi.org/10.1016/j.is.2020.101686>
- Lee, J., Kim, H., Kim, H., Lim, H. R., Kim, Y. S., Thi, T. T. H., Choi, J. J., Jeong, G. J., Kim, H., Kim, H., Herbert, R., Soltis, I., Kim, K. R., Lee, S. H., Kwon, Y., Lee, Y., Jang, Y. C., & Yeo, W. H. (2024). Large-scale smart bioreactor with fully integrated wireless multivariate sensors and electronics for long-term in situ monitoring of stem cell culture. *Science Advances*, 10(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk6714>
- Li, D. W., Liu, Z., Wei, J., Liu, Y., & Hu, L. (2012). Contribution of endothelial progenitor cells to neovascularization. In (Vol. 30, pp. 1000-1006): Spandidos Publishing.
- Liu, Y., Lyons, C. J., Ayu, C., & O'Brien, T. (2024). Recent advances in endothelial colony-forming cells: from the transcriptomic perspective. *Journal of Translational Medicine*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12967-024-05108-8>
- Lois, N., McCarter, R., Oâ€™Neill, C., Medina, R. J., & Stitt, A. W. (2014). Endothelial Progenitor Cells in Diabetic Retinopathy. In (Vol. 5): Frontiers Media.
- Luna-González, M., Becerra-Bayona, S., Serrano, N. C., & Lobo-Quintero, R. (2020). Implementación de tecnologías libres y sensores remotos para un biobanco: el desafío de producir a bajo costo. *Información tecnológica*, 31(2), 149-162. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642020000200149>
- M, L. J., & Shanmugasundaram, R. S. (2021). Design and Implementation of Intelligent Classroom Framework Through Light-Weight Neural Networks Based on Multimodal Sensor Data Fusion Approach. *Revue d'intelligence artificielle*, 35(4), 291-300. <https://doi.org/10.18280/ria.350403>
- Ma, Z., Yang, Y., Huang, Y., & Lui, K. O. (2021). Endothelial contribution to COVID-19: an update on mechanisms and therapeutic implications. *Journal of Molecular and Cellular Cardiology*, 164, 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.yjmcc.2021.11.010>
- Mai, M., Luo, S., Fasciano, S., Oluwole, T. E., Ortiz, J., Pang, Y., & Wang, S. (2023). Morphology-based deep learning approach for predicting adipogenic and osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells (hMSCs). *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fcell.2023.1329840>
- Mankins, J. C. (1995). *Technology readiness levels*.
- Marino, M., Sauty, B., & Vairo, G. (2024). Unraveling the complexity of vascular tone regulation: a multiscale computational approach to integrating chemo-mechano-biological pathways with cardiovascular biomechanics. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 23(4), 1091-1120. <https://doi.org/10.1007/s10237-024-01826-6>
- Mata, Á., Azevedo, H. S., Botto, L., Gavara, N., & Su, L. (2017). New Bioengineering Breakthroughs and Enabling Tools in Regenerative Medicine. In (Vol. 3, pp. 83-97): Springer Science+Business Media.
- Millar, J., Sethi, S. S., Haddadi, H., & Madhavapeddy, A. (2024). Terracorder: Sense Long and Prosper. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2408.02407>
- Mintet, E. (2015). Implication of endothelial to mesenchymal cell transition in the development of healthy digestive tissue injury following radiotherapy. *HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe)*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01327201>
- Moccia, F., Dragoni, S., Lodola, F., Bonetti, E., Bottino, C., Guerra, G., Laforenza, U., Rosti, V., & Tanzi, F. (2012). Store-Dependent Ca²⁺ Entry in Endothelial Progenitor Cells As a Perspective Tool to Enhance Cell-Based Therapy and Adverse Tumour Vascularization. In (Vol. 19, pp. 5802-5818): Bentham Science Publishers.

- Modupe, O. T., Otitoola, A. A., Oladapo, O. J., Abiona, O. O., Oyeniran, O. C., Adewusi, A. O., Komolafe, A. M., & Obijuru, A. (2024). REVIEWING THE TRANSFORMATIONAL IMPACT OF EDGE COMPUTING ON REAL-TIME DATA PROCESSING AND ANALYTICS. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(3), 693-702. <https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i3.929>
- Moraleda, B. J., Fontana, J. M. M., González, A. E., Ferreruella, S. L., Juberias, Y. U., & García, A. B. (2021). Hemostasia. Revisión bibliográfica. *Revista Sanitaria de Investigación*, 2(9), 137. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8081047>
- Naudot, M. (2013). Characterization of liver cell culture in micro-fluidic biochips by a real time imaging analysis. *HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe)*. <https://theses.hal.science/tel-00965539>
- Negrete, J. C. (2018). Internet of things in Mexican agriculture; a technology to increase agricultural productivity and reduce rural poverty. *Research and Analysis Journal*, 1(2), 40-52.
- Nielsen, J., Lewis, J. D., & Turner, C. W. (2006). Determining Usability Test Sample Size. In. <https://doi.org/10.1201/9780849375477.ch597>
- O'Neill, C., McLoughlin, K. J., Chambers, S., Guduric-Fuchs, J., Stitt, A. W., & Medina, R. J. (2018). The Vasoreparative Potential of Endothelial Colony Forming Cells: A Journey Through Pre-clinical Studies. In (Vol. 5): Frontiers Media.
- Orozco, A. E. R. (2024). *Diseño e implementación de un sistema de extrusión directa en una impresora 3D cartesiana para tintas conductivas aplicado en la generación de circuitos impresos flexibles Riobamba*.
- Pacheco, J. E. (2014). Editorial. *Anales de la Facultad de Medicina*, 75(4). <https://doi.org/10.15381/anales.v75i4.10842>
- Páez, J. L. V., Montalvo, M., Aguayo, S., Páez, P. A. V., Velarde, G., González, F. E. J., & Barboza, J. J. (2019). Glicocálix endotelial: relevancia clínica y enfoque traslacional. *Horizonte Médico (Lima)*, 19(4), 84-92. <https://doi.org/10.24265/horizmed.2019.v19n4.12>
- Pai, S. (2019). Convolutional Neural Network Classifying Tumors. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 7(6), 1593-1595. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.6269>
- Park, H. A. (2016). Are We Ready for the Fourth Industrial Revolution? *Yearbook of medical informatics*, 25(1), 1-3. <https://doi.org/10.15265/iy-2016-052>
- Parks, D. F., Voitiuk, K., Geng, J., Elliott, M. A. T., Keefe, M. G., Jung, E., Robbins, A., Baudin, P. V., Ly, V. T., Hawthorne, N., Yong, D., Sanso, S. E., Rezaee, N., Sevetson, J., Seiler, S. T., Currie, R., Pollen, A. A., Hengen, K. B., Nowakowski, T. J., . . . Haussler, D. (2022). IoT cloud laboratory: Internet of Things architecture for cellular biology. *Internet of Things*, 20, 100618-100618.
- Pelle, M. C., Zaffina, I., Luca, S. D., Forte, V., Trapanese, V., Melina, M., Giofrè, F., & Arturi, F. (2022). Endothelial Dysfunction in COVID-19: Potential Mechanisms and Possible Therapeutic Options. *Life*, 12(10), 1605-1605. <https://doi.org/10.3390/life12101605>
- Pérez, P., Huertas, G., Maldonado-Jacobi, A., Martín, M. E., Serrano, J. M., Olmo, A., Daza, P., & Yúfera, A. (2018). Sensing Cell-Culture Assays with Low-Cost Circuitry. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27295-3>
- Pérez, P., Maldonado-Jacobi, A., Lopez-Angulo, A., Martínez, C., Olmo, A., Huertas, G., & Yúfera, A. (2017). Remote Sensing of Cell-Culture Assays. In *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/67496>
- Peyroteo, M., Ferreira, I. A., Elvas, L. B., Ferreira, J. C., & Lapão, L. V. (2021). Remote Monitoring Systems for Patients With Chronic Diseases in Primary Health Care: Systematic Review. *JMIR mHealth and uHealth*, 9(12). <https://doi.org/10.2196/28285>
- Poredoš, P., & Ježovnik, M. K. (2012). Testing Endothelial Function and its Clinical Relevance. In (Vol. 20, pp. 1-8): Japan Atherosclerosis Society.
- Qaddoori, S. L., Fathi, I. a., Hammoudy, M. A., & Ali, Q. I. (2023). Advancing Public Health Monitoring through Secure and Efficient Wearable Technology. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 13(6), 1001-1014. <https://doi.org/10.18280/ijssse.130603>
- Reina-Cufiño, M. R. (2021). Control domótico y monitoreo por medio de IOT. *Visión electrónica*, 15(1), 84-93. <https://doi.org/10.14483/22484728.15572>

- Ricard, N., Bailly, S., Guignabert, C., & Simons, M. (2021). The quiescent endothelium: signalling pathways regulating organ-specific endothelial normalcy. *Nature Reviews Cardiology*, 18(8), 565-580. <https://doi.org/10.1038/s41569-021-00517-4>
- Richardson, M. R., & Yöder, M. C. (2010). Endothelial progenitor cells: Quo Vadis? In (Vol. 50, pp. 266-272): Elsevier BV.
- Rivas, R., Grossling, B., & Galván, P. (2023). Aplicación de la Telemática en el monitoreo remoto de Bancos de Muestras Biológicas. Estudio Preliminar. *Memorias del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Salud*, 21(1). <https://doi.org/10.18004/mem.iics/1812-9528/2023.e21122304>
- Roberts, K. A., Colley, L., Agbaedeng, T. A., Ellison, G. M., & Ross, M. (2020). Vascular Manifestations of COVID-19 – Thromboembolism and Microvascular Dysfunction. In (Vol. 7): Frontiers Media.
- Rossi, E., Bernabéu, C., & Smadja, D. M. (2019). Endoglin as an Adhesion Molecule in Mature and Progenitor Endothelial Cells: A Function Beyond TGF- β . In (Vol. 6): Frontiers Media.
- Rovira, R. H., Fernandez, A. P., Bayas, M. M., Montaña, M., Morales, Ó. W. G., & Figueroa, J. (2025). Sistema de monitoreo de parámetros cardiovasculares basado en IoT y MQTT para alertas médicas. *Ingenius*(34), 75-88. <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.06>
- Rueda, J. S. R., & Portocarrero, J. M. T. (2017). Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora. *Revista colombiana de computación*, 18(2), 58-74. <https://doi.org/10.29375/25392115.3218>
- Sage, D., Neumann, F., Hediger, F., Gasser, S. M., & Unser, M. (2005). Automatic tracking of individual fluorescence particles: application to the study of chromosome dynamics. *IEEE Transactions on Image Processing*, 14(9), 1372-1383. <https://doi.org/10.1109/tip.2005.852787>
- Saha, R. (2025). IoT-Powered Real-Time InPatient Monitoring System with Seamless Connectivity and Insights. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 13(4), 5882-5889. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.69688>
- Sandhu, K. S., Njoroge, W., Yang, Y., AGS, H., & Butler, R. (2017). Endothelial Progenitor Cell Identification, Classification and Nomenclature: A Review. In (Vol. 8): OMICS Publishing Group.
- Savicheva, A. A., Бернс, С. А., Isaykina, O. Y., Gorshkov, A. Y., Веремеев, А. В., & Драпкина, О. М. (2025). Paraclinical diagnostics of endothelial function reflecting vascular stiffness: the present and prospects. Literature review. *CARDIOVASCULAR THERAPY AND PREVENTION*, 24(6), 4426-4426.
- Schwarz, N., & Yadegari, H. (2023). Potentials of Endothelial Colony-Forming Cells: Applications in Hemostasis and Thrombosis Disorders, from Unveiling Disease Pathophysiology to Cell Therapy. In (Vol. 43, pp. 325-337): Thieme Medical Publishers (Germany).
- Seeto, W. J., & Lipke, E. A. (2016). Optical cell tracking analysis using a straight-forward approach to minimize processing time for high frame rate data. *Review of Scientific Instruments*, 87(3), 33705-33705. <https://doi.org/10.1063/1.4943420>
- Sevilla-González, M., Loaeza, L. M., Lazaro-Carrera, L. S., Bourguet-Ramirez, B., Rodríguez, A. V., Peralta-Pedrero, M. L., & Almeda-Valdés, P. (2020). Spanish Version of the System Usability Scale for the Assessment of Electronic Tools: Development and Validation. *JMIR Human Factors*, 7(4). <https://doi.org/10.2196/21161>
- Shah, P. H. (2024). MQTT Systems: A Survey. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(3), 1063-1067. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.59000>
- Shuvaev, V. V., Brenner, J. S., & Muzykantov, V. R. (2015). Targeted endothelial nanomedicine for common acute pathological conditions. In (Vol. 219, pp. 576-595): Elsevier BV.
- Skandarajah, A., Reber, C., Switz, N. A., & Fletcher, D. A. (2014). Quantitative Imaging with a Mobile Phone Microscope. *PLOS ONE*, 9(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096906>
- Sprenger, J., Perera, R. K., Götz, K. R., & Nikolaev, V. O. (2012). FRET Microscopy for Real-time Monitoring of Signaling Events in Live Cells Using Unimolecular Biosensors. *Journal of Visualized Experiments*(66). <https://doi.org/10.3791/4081>

- Srivastav, A. K., Das, P., & Srivastava, A. K. (2023a). Introduction to Biotechnology and IoT Integration. In *Apress eBooks* (pp. 1-24).
- Srivastav, A. K., Das, P., & Srivastava, A. K. (2023b). Smart Laboratories and IoT Transformation. In *Apress eBooks* (pp. 37-73).
- Suárez, A. C. M., Ávila, S. S. D., & Páez, M. Á. L. (2019). Mecanismos de seguridad en el internet de las cosas. *Revista vínculos*, 16(2), 288-297. <https://doi.org/10.14483/2322939x.15758>
- Sung, J. H., Wang, Y. I., Sriram, N. N., Jackson, M., Long, C. J., Hickman, J. J., & Shuler, M. L. (2018). Recent Advances in Body-on-a-Chip Systems. In (Vol. 91, pp. 330-351): American Chemical Society.
- Talebipour, A., Saviz, M., Vafaiee, M., & Faraji-Dana, R. (2024). Facilitating long-term cell examinations and time-lapse recordings in cell biology research with CO2 mini-incubators. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52866-y>
- Theofilis, P., Sagris, M., Oikonomou, E., Antonopoulos, A. S., Siasos, G., Tsioufis, C., & Tousoulis, D. (2021). Inflammatory Mechanisms Contributing to Endothelial Dysfunction. *Biomedicines*, 9(7), 781-781. <https://doi.org/10.3390/biomedicines9070781>
- Torrente, M., Follador, A., Calcante, A., Casati, P., & Oberti, R. (2025). Development and Validation of a Low-Cost Imaging System for Seedling Germination Kinetics through Time-Cumulative Analysis. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2510.05668>
- Ubidots. (2024). *Software IoT para Industria 4.0*. <https://es.ubidots.com/>
- Vargas-Elizondo, C. (2020). On the Role of Ethics in Shaping Technology Development. *HighTech and Innovation Journal*, 1(2), 86-100. <https://doi.org/10.28991/hij-2020-01-02-05>
- Velasco, V., Shariati, S. A., & Esfandyarpour, R. (2020). Microtechnology-based methods for organoid models. In (Vol. 6): Springer Nature.
- Vicentini, B., Braga, R. A., Gomes, J. E. S., & González-Peña, R. d. J. (2023). Optical improvement of the dynamic laser speckle for seed analysis using portable digital camera. *Ciência e Agrotecnologia*, 48.
- Vo, Q. D., Saito, Y., Ida, T., Nakamura, K., & Yuasa, S. (2024). The use of artificial intelligence in induced pluripotent stem cell-based technology over 10-year period: A systematic scoping review. *PLOS ONE*, 19(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302537>
- Wacogne, B., Vaccari, N., Koubevi, C., Belinger-Podevin, M., Robert-Nicoud, M., Rouleau, A., & Frelet-Barrand, A. (2022). Absorption Spectra Description for T-Cell Concentrations Determination and Simultaneous Measurements of Species during Co-Cultures. *Sensors*, 22(23), 9223-9223. <https://doi.org/10.3390/s22239223>
- Wrzesinski, K., Alnøe, S., Jochumsen, H. H., Mikkelsen, K., Bryld, T. D., Vistisen, J. S., Alnøe, P. W., & Fey, S. J. (2021). A Purpose-Built System for Culturing Cells as In Vivo Mimetic 3D Structures. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96091>
- Yalçınkaya, F., Aydılek, H., Erten, M. Y., & İnanç, N. (2020). IoT based Smart Home Testbed using MQTT Communication Protocol. *Uluslararası mühendislik araştırma ve geliştirme dergisi*, 317-317. <https://doi.org/10.29137/umagd.654056>
- Zhai, W., Yong, D., El-Jawhari, J. J., Cuthbert, R., McGonagle, D., Naing, M. W., & Jones, E. (2019). Identification of senescent cells in multipotent mesenchymal stromal cell cultures: Current methods and future directions. In (Vol. 21, pp. 803-819): Elsevier BV.
- Zhang, J., Tecson, K. M., & McCullough, P. A. (2020). Endothelial dysfunction contributes to COVID-19-associated vascular inflammation and coagulopathy. *Reviews in Cardiovascular Medicine*, 21(3), 315-319. <https://doi.org/10.31083/j.rcm.2020.03.126>
- Zhou, J., Sun, Y., & Tellambura, C. (2025). Revolutionizing Medical Data Transmission with IoMT: A Comprehensive Survey of Wireless Communication Solutions and Future Directions. *ArXiv.org*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2504.02446>
- Михайличенко, М. И., & Шаповалов, К. Г. (2019). Microcirculatory disturbances in the pathogenesis of local cold injuries. *Regional blood circulation and microcirculation*, 18(2), 4-11.

