



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE
TECNOLOGÍAS DE IOT PARA EL MONITOREO REMOTO DE PH EN AGUA DE SOLUCIÓN
DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO PARA MEJORA DE
CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS**

José Alejandro Pablo

Asesorado por el MSc. Ing. Jaime Eduardo Mercar

Guatemala, agosto de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE
TECNOLOGÍAS DE IOT PARA EL MONITOREO REMOTO DE PH EN AGUA DE SOLUCIÓN
DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO PARA MEJORA DE
CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ ALEJANDRO PABLO

ASESORADO POR EL MSC. ING. JAIME EDUARDO MERCAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes
EXAMINADOR	Ing. Sergio Leonel Gómez Bravo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE
TECNOLOGÍAS DE IOT PARA EL MONITOREO REMOTO DE PH EN AGUA DE SOLUCIÓN
DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO PARA MEJORA DE
CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha febrero de 2020.

José Alejandro Pablo

Ref. EEPFI-066-2020
Guatemala, 27 de enero de 2020

Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **José Alejandro Pablo** carné número **201114030**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Gestión Industrial.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular,

Atentamente,


"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Jaime Eduardo Mercar Chonay
Asesor

Jaime E. Mercar Chonay
Ingeniero Electricista
Céd. 232879


Mtro. Carlos Humberto Aroche Sandoval
Coordinador de Maestría
Gestión Industrial




Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





REF. EIME 05. 2020.

Guatemala, 6 DE FEBRERO 2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IoT PARA MONITOREO REMOTO DE pH EN AGUA DE SOLUCIÓN DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO PARA MEJORA DE CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS, presentado por el estudiante universitario; JOSÉ ALEJANDRO PABLO, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica





DTG. 195.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IOT PARA EL MONITOREO REMOTO DE PH EN AGUA DE SOLUCIÓN DE NUTRIENTES EN UN SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO PARA MEJORA DE CALIDAD Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS**, presentado por el estudiante universitario: **José Alejandro Pablo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por tu guía y acompañamiento en cada momento de mi vida. Todo lo puedo en ti que me fortaleces.

Mi madre

Por tu esfuerzo y ejemplo de trabajo y superación.

Mis tíos

Carmen y Oliver Pablo, por su acompañamiento y soporte incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

Facultad de Ingeniería	Por ser mi segunda casa en esta etapa y darme las herramientas para mi vida profesional.
Mis amigos de la Facultad y familias	Freddy Ruano y José Rocha, por su apoyo y compañerismo en cursos y proyectos de electrónica.
Familia Velásquez	Por ser una importante influencia en mi formación de ética y valores que me acompañan siempre.
Familia Carranza	Por compartir cada logro y momentos especiales en este viaje. Gracias por el apoyo y motivación.
MSc. Ing. Jaime Mercar	Por su asesoría y apoyo profesional en la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA	9
3.1. Descripción del problema	9
3.2. Formulación del problema	10
3.3. Preguntas auxiliares de investigación	10
3.4. Delimitación del problema	11
3.5. Viabilidad.....	12
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	15
5.1. General.....	15
5.2. Específicos	15
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	17

7.	MARCO TEÓRICO	19
7.1.	Agricultura urbana e hidroponía	19
7.1.1.	Categorías de agricultura urbana	20
7.1.2.	Agricultura familiar.....	21
7.1.3.	Conceptos de hidroponía	21
7.1.3.1.	Cultivo en agua	23
7.1.3.1.1.	Tipos de sistemas en solución o hidropónicos.....	23
7.1.3.2.	Elementos que componen un sistema de cultivo sin suelo	27
7.1.3.2.1.	Solución nutritiva.....	27
7.1.4.	Localización del huerto hidropónico urbano	33
7.1.5.	Ventajas y desventajas de los cultivos hidropónicos.....	34
7.2.	IoT en la agricultura, la agricultura inteligente.....	35
7.2.1.	Internet de las cosas IoT	38
7.2.1.1.	Modelos de comunicación del IoT	42
7.2.2.	Redes de área amplia de baja potencia – LPWAN.....	47
7.2.2.1.	Plataformas y tecnologías basadas en LPWAN.....	48
7.2.2.1.1.	Sigfox	49
7.2.2.1.2.	Weightless.....	51
7.2.2.1.3.	Nwave	52
7.2.2.1.4.	NB-IoT.....	53
7.2.2.1.5.	LoRa®.....	54
7.2.3.	Especificación LoraWAN.....	56
7.2.3.1.	Banda ISM.....	58

	7.2.3.2.	Configuración de red	61
7.2.4.		Protocolos y plataformas IoT	63
	7.2.4.1.	MQTT	65
	7.2.4.2.	Mosquitto	67
	7.2.4.3.	Node-RED	68
	7.2.4.4.	Tecnologías móviles	70
	7.2.4.5.	Base de datos en tiempo real (RTDBS)	72
		7.2.4.5.1. Firebase	76
7.2.5.		Sensores de potencial de hidrógeno (pH)	77
	7.2.5.1.	Tipos de sensores	78
		7.2.5.1.1. Sensor de vidrio.....	78
		7.2.5.1.2. Sensor combinado.....	81
		7.2.5.1.3. Sensor de pH diferencial	84
		7.2.5.1.4. Sensores de pH inteligentes	85
	7.2.5.2.	Monitoreo de pH dentro de un sistema de cultivo hidropónico.....	86
7.3.		Calidad en la producción de hortalizas	88
	7.3.1.	Administración de la calidad en producción de alimentos	88
	7.3.2.	Gestión de aseguramiento de la calidad.....	90
		7.3.2.1. Buenas prácticas agrícolas.....	94
		7.3.2.2. Aplicación de BPA en la cadena de producción	96
		7.3.2.3. Ventajas de implementar BPA.....	96
		7.3.2.4. Consideraciones para la implementación de la BPA.....	98

7.3.3.	Certificaciones en el comercio de hortalizas	103
7.3.4.	Indicadores de gestión	104
7.3.4.1.	Fichas de autoevaluación.....	105
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO	107
9.	METODOLOGÍA	111
10.	TÉCNICAS DE ANALISIS DE INFORMACIÓN	115
11.	CRONOGRAMA	117
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	119
13.	REFERENCIAS	121

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Flujograma de la solución	18
2.	Efecto de la variación de nutrientes en los cultivos.....	32
3.	Tecnologías utilizadas en un ecosistema de Smart Farming	36
4.	Internet de las cosas "nació" entre los años 2008 y 2009	40
5.	Modelo de comunicación Device-to-Device	42
6.	Modelo de comunicación Device-to-Cloud	44
7.	Modelo de comunicación Device-to-Gateway	45
8.	Modelo de comunicación Back-End Data Sharing	46
9.	Ancho de banda contra rango de cobertura de redes inalámbricas	48
10.	Ancho de banda requerido contra capacidad de rango de corta distancia, celular y LPWA.....	49
11.	Arquitectura de red Sigfox.....	50
12.	Modos de operación NB-IoT	54
13.	Protocolo LoRaWAN (Semtech).....	56
14.	Comunicación bidireccional entre dispositivo final y estación base para LoRaWAN clase A	57
15.	Las tres son bandas reguladas para Guatemala. (SIT).....	60
16.	Topología de red para implementación de IoT con Sigfox, LoRaWAN o NB-IoT.....	62
17.	Modelo publicación - suscripción utilizado por MQTT	66
18.	Pasos para aplicación en Node-Red.....	69
19.	Generaciones de los sistemas de comunicaciones móviles.....	70
20.	Esquema de publicación en la nube.....	72

21.	Tiempo de vida de las transacciones representado como funciones de valor	74
22.	Partes de una sonda de pH. (Sensorex).....	82
23.	Esquema de un sensor de pH diferencial. (Sensorex).....	84
24.	Esquema de control y monitoreo de un sistema hidropónico. (Sensorex)	87
25.	Conceptos para el aseguramiento de la calidad e inocuidad de un alimento	91
26.	Interacción entre BPA, BPM y HACCP	92
27.	BPA como parte de un sistema de aseguramiento de la calidad.....	93
28.	Principios básicos de BPA	95
29.	Cronograma de actividades	117

TABLAS

I.	Capacidad de intercambio catiónico para diferentes sustratos.....	25
II.	Influencia en la porosidad y retención de agua según el tamaño de las partículas.....	27
III.	Compatibilidad de frecuencias LoRaWAN según la región.....	60
IV.	Comparación de las plataformas web para IoT	64
V.	Sensores de vidrio con diferentes tipos de diafragma	79
VI.	Sensores ISFET con diferentes tipos de diafragma.....	80
VII.	Sensores combinados con diferentes tipos de diafragma.....	83
VIII.	Operativización de variables	114
IX.	Presupuesto para el desarrollo de la investigación.....	119

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
GHz	Gigahercio
Hz	Hercio
kB	Kilobyte
Kbps	Kilobyte por segundo
Mbps	Megabyte por segundo
MHz	Megahercio
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
Q	Quetzal

GLOSARIO

ASCII	American Standard Code for Information Exchange.
BPA	Buenas Prácticas Agrícolas.
Codex Alimentarius	Código Alimentario.
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
GPS	Global Positioning System.
HTTP	Hypertext Transfer Protocol.
INCAP	Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá.
IEEE	Institution of Electrical and Electronics Engineers.
IoT	Internet of Things.
IP	Internet Protocol.
MQ	Message Queueing.

MQTT	MQ Telemetry Transport.
NTP	National Pipe Thread, rosca estadounidense cónica para tubos.
PAFFEC	Programa de Agricultura Familiar para el fortalecimiento de la economía campesina.
QoS	Quality of Service.

RESUMEN

La propuesta que se plantea busca la mejora de la calidad y rendimiento en la producción de cultivos hidropónicos en un contexto de agricultura urbana inteligente, que ayude en la seguridad alimentaria y economía doméstica de las familias.

Para lograrlo se propone un sistema de monitoreo remoto utilizando las tecnologías del internet de las cosas como medio para el envío, almacenamiento y posterior visualización de los niveles de pH en agua de solución nutritiva en un sistema hidropónico de técnica de película nutritiva NFT. Para el desarrollo, se evalúan y aplican las mejores prácticas agrícolas como parte de un sistema de aseguramiento de la calidad que permita garantizar salud e inocuidad en los cultivos cosechados.

La medición de los niveles de pH se realiza desde el trasplante hasta la cosecha. Con los datos de los niveles de pH el productor podrá disponer de trazabilidad en los procesos y tomar decisiones para garantizar niveles correctos de pH en la solución que permita el correcto desarrollo de los cultivos. Determinando finalmente, si existe correlación entre la medición constante de los niveles de pH y la calidad y rendimiento de las cosechas obtenidas.

1. INTRODUCCIÓN

La problemática de la tendencia del crecimiento en los próximos años de la población mundial, la cual es principalmente urbana, así como el uso inadecuado, ineficiente e insostenible del agua y de grandes extensiones de suelo utilizadas para la producción de cultivos, hace necesario impulsar el desarrollo de nuevas técnicas de producción de cultivos sin suelo en espacios urbanos que permitan satisfacer la alta demanda de alimentos.

La importancia de la solución propuesta reside en garantizar calidad, inocuidad y rendimiento en los cultivos hidropónicos cultivados en espacios urbanos, por medio del monitoreo constante de las distintas variables que influyen en la calidad de las cosechas. Se aplica en conjunto con lineamientos que las buenas prácticas agrícolas recomiendan para la precosecha, desarrollo y postcosecha de los cultivos hidropónicos.

Entre los resultados y beneficios esperados en esta investigación se encuentra el incremento en la calidad y rendimiento de las cosechas al minimizar las fuentes de contaminación que puedan provocar enfermedades o pérdida total de las cosechas.

El diseño y metodología que se plantea para lograr los objetivos de la investigación es un diseño de tipo experimental que involucra a dos grupos de cosechas de lechuga hidropónica de 200 plantaciones cada uno. En el primer grupo se utiliza un método de medición de pH del agua de solución de forma manual con papel de prueba. En el otro grupo la medición de la variable se realiza de forma remota. Los datos de la medición son almacenados en una base de

datos para su trazabilidad. Se correlacionan los niveles de pH durante el desarrollo de los cultivos y el rendimiento de los cultivos cosechados.

En el capítulo I, Marco Teórico, se detallan los elementos que componen un sistema hidropónico, así como las tecnologías de IoT aplicadas al diseño de un sistema de monitoreo remoto para captura de niveles de pH en agua de solución de nutrientes en cultivos hidropónicos. Se explica además cómo su utilización conjunta busca aprovechar de mejor manera el uso del agua y los espacios dentro de las ciudades, para que la familias urbanas produzcan cultivos de calidad, frescos, sanos e inocuos. También se busca que puedan ser utilizados para consumo propio y permitan el desarrollo de microempresas familiares rentables dedicadas a la producción de cultivos hidropónicos.

En el capítulo II se presentarán los resultados de aplicar la solución de IoT a uno de los dos grupos en que se divide el huerto hidropónico urbano.

En el capítulo III se discutirá los resultados en la cosecha de los cultivos.

2. ANTECEDENTES

Los aportes en el desarrollo de las distintas técnicas de producción de cultivos sin suelo han ido de la mano con el uso de tecnologías para automatizar procesos que permitan un mayor aprovechamiento de los recursos utilizados en la producción. Las herramientas tecnológicas implementadas van desde automatización para la dosificación de nutrientes, para la recirculación de la solución en sistemas hidropónicos NFT y un conjunto de sensores para el monitoreo de las condiciones físicas dentro del invernadero.

Tal como lo indica Beltrano y Giménez (2015), entre los grandes aportes del modernismo fue lograr que la automatización del cultivo hidropónico sea una realidad al introducir los avances en la informática para su control y ejecución de tareas. Si un sistema de cultivo hidropónico es implementado en un área aislada y climatizada, es un sistema replicable y en consecuencia es objeto de para la investigación y enseñanza. (p.9)

Beltrano y Giménez (2015) también se enfatiza que la hidroponía “se proyecta como una solución al problema de la disminución de las zonas agrícolas, resultado de la contaminación, desertización, cambio climático y el crecimiento desproporcionado de las ciudades” (p.1).

Urrestarazu, *et al.* (2004) distingue que “entre las incorporaciones más recientes en la infraestructura hidropónica, el control tanto físico como telemático y seguimiento de las instalaciones gracias a las modernas tecnologías de la información y automatizaciones de los procedimientos de su manejo” (p.18).

El desarrollo tecnológico y la innovación también se observa mediante grupos emprendedores apoyados por iniciativas como ViaVigo, una de las aceleradoras empresariales más importantes de España, la cual ha contribuido con aportes financieros a varios proyectos, entre ellos, H2Hydroponics. En una entrevista a los 10 proyectos en fase de aceleración de ViaVigo (2013) se resaltan algunos factores que ayudan a mejorar el rendimiento en cultivos hidropónicos tales como menor merma del producto, control de los nutrientes aportados, aumento del número de ciclos de producción y la mejor gestión del control de plagas y enfermedades.

Otro aporte de H2Hydroponics es su modelo de negocio, el cual se basa en proyectos desarrollados con llave en mano, que van desde invernaderos y sistemas de riego hasta estructuras de cultivo, consumibles y maquinaria para el control climático en los invernaderos.

La implementación de un huerto hidropónico urbano necesita de formación por parte de los productores, así como asesoramiento y acompañamiento en las primeras etapas de los proyectos para la elección de la especie a cultivar según las condiciones climáticas de región. También consideran los aspectos químicos vitales que los distintos tipos de cultivos hidropónicos requieren de las soluciones de nutrientes.

Una vez dominados estos conceptos, Guzmán (2004) propone que un pequeño proyecto hidropónico fácilmente puede crecer y ayudar al ingreso de las familias; existen varios casos de este tipo, tales como grupos de mujeres asociadas que comercializan hortalizas y otras plantas hidropónicas.

En Guatemala, en el Manual técnico de hidroponía popular realizado por Castañeda (1997) con el apoyo del INCAP, se denota que la hidroponía popular

mejora el acceso, disponibilidad y calidad de la alimentación familiar al producir cultivos ricos en elementos nutritivos que no forman parte de la alimentación diaria de la población guatemalteca de escasos recursos, como el maíz y frijol. Además, se indica que son varios los países de Latinoamérica que han llegado a producir hortalizas que mejoran y complementan la alimentación de la población y que, además, generan un ingreso económico tras la venta de los excedentes producidos.

En este contexto, tal como lo expresa el Viceministro de Desarrollo Rural Integral del Ministerio de Agricultura y Tierras de Venezuela, Gil (2004), la importancia de la creación y difusión a la población de manuales de formación en microhuertos es de vital importancia, ya que la tecnología hidropónica popular permite alternativas de producción de alimentos para que muchas familias y comunidades que viven en espacios con grandes limitaciones, logren disponer de estos de manera continua e inocua.

El mejoramiento de la calidad y producción de los cultivos mediante las técnicas de hidroponía aplicadas en conjunto con buenas prácticas agrícolas han tenido resultados importantes, como se menciona en el estudio Evaluación de sustratos en un cultivo de lechuga bajo un sistema hidropónico en el municipio de Pasto, Guerrero (2014). Esta investigación fue realizada en el departamento de Nariño, Colombia, cuya producción de lechuga en el 2010 fue de 4.5 toneladas. En este departamento, le han apostado al desarrollo económico, a la productividad y competitividad incorporando tecnologías sostenibles de producción en las cadenas productivas del sector agroindustrial.

Por lo tanto, en esta región la hidroponía ha permitido una mayor producción de forma constante. Para lograrlo, ha sido necesaria la mejora de las técnicas para el manejo de los cultivos, la implementación de buenas prácticas

agrícolas así como técnicas como la agricultura urbana que se convierten en una estrategia para el desarrollo socioeconómico de esta región.

Para minimizar los riesgos en la implementación de un huerto hidropónico urbano y asegurar su sostenibilidad, es necesario contar con las herramientas tecnológicas que le faciliten al productor la recolección de datos de las variables del estado del invernadero y programar de forma autónoma las tareas repetitivas para que los procesos sean más eficientes. Esto se puede demostrar en el trabajo de Muñoz (2011), basado en un sistema de instrumentación y monitoreo para el invernadero la Aldana de la universidad del Quindío, en donde se diseñó un control para la activación de una electroválvula por histéresis que permite el paso de agua por goteo para el sistema de riego instalado en el invernadero.

La relación entre las buenas prácticas agrícolas en cultivos hidropónicos y la necesidad del monitoreo de la calidad de agua de la solución de nutrientes puede evidenciarse también en el análisis de caso en el proceso de producción de lechugas hidropónicas realizado por Mondino (2015), en la provincia de Córdoba, Argentina, donde el principal objetivo del estudio es buscar una mejor eficiencia del sistema, así como su rentabilidad y calidad. En dicho trabajo se expone que, luego de las observaciones y auditorías del proceso productivo, se detallan algunos puntos de mejora en relación a las buenas prácticas agrícolas con respecto al agua, manejo y uso de plaguicidas, cosecha, control de higiene y sanidad del personal. Se concluye que hay muchos aspectos que se pueden mejorar, por ejemplo, realizar análisis del agua de solución y otras relacionadas a la inocuidad como el uso de gorro, barbijo y botas durante la recolección de la lechuga.

De igual forma, como sostiene Amma A.T. (1993), quien ha realizado actividades relacionadas a la producción de hortalizas sin suelo en la Estación Experimental Agropecuaria San Pedro del INTA, Argentina describe:

La producción de hortalizas sin suelo permitirá la obtención de producciones de calidad, con rentabilidad de por medio y con altos índices de rendimiento sostenibles en el tiempo y que a la vez contribuirá a la preservación del medio ambiente. Para el caso de estudio mencionado, se enfocó en el sistema de riego, el cual consistió en implementar tecnología en el sistema de bombeo para la inyección de las soluciones A y B de nutrientes y filtro de anillas. El momento y la duración del riego, se reguló por medio de dos temporizadores con la opción de poder programar seis riegos diarios por tiempo y fijar distintas relaciones de riego en base a datos de pH y la conductividad eléctrica de la solución. (Amma, 1993, p.10)

Amma y Cascardo (s.f.), también remarcan la importancia que tiene en el mercado, la producción de cultivos de calidad integral (inocuos, sin residuos y sin contaminantes) certificados y con trazabilidad. Por lo tanto, para darle cumplimiento a estas exigencias, es necesario seguir protocolos de producción que establezcan normas de manejo integrado de cultivo y plagas, durante la cosecha y poscosecha.

3. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

Calidad e inocuidad deficiente en cosechas de cultivos hidropónicos urbanos debido a la falta de monitoreo constante de pH en agua de solución de nutrientes.

3.1. Descripción del problema

La falta de un sistema de monitoreo remoto de las variables de calidad de agua de solución en cultivos hidropónicos como pH, conductividad, oxigenación y temperatura mediante el uso de tecnología, provoca riesgos de contaminación durante el proceso de producción. Afecta el rendimiento en la producción y calidad de los cultivos, así como la salud de los microproductores y consumidores finales.

Conocer el estado de la solución en tiempo real es vital durante la etapa de crecimiento de los cultivos hidropónicos, ya que estos absorben nutrientes y agua en distintas proporciones durante su desarrollo; por lo tanto, disponer esta información le permite al productor una mejor toma de decisiones en cuanto al momento adecuado para realizar los ajustes, tanto del volumen de agua como de la composición química de la solución y, de igual forma, planificar la limpieza y mantenimiento de los elementos que conforman el sistema hidropónico con el fin de garantizar cultivos sanos y seguros.

La toma de datos del estado de la solución de forma local y manual, requiere la asignación de una gran cantidad de recursos. En huertos urbanos el proceso se vuelve ineficiente, ya que se necesita de equipo de medición especializado, recurso humano capacitado en medición con disposición a permanecer de forma presencial en el invernadero durante la toma de datos y un plan de monitoreo. Si este no se cumple, aumenta el riesgo de contaminación de la solución y los cultivos, sin contar con la posibilidad de que se pueden cometer errores al momento de transcribir los resultados o se olvide la programación de toma de las distintas lecturas en el momento establecido.

Al no tener una base de datos con los registros históricos del estado de la solución durante la producción del lote, puede afectar de forma directa la inocuidad, calidad y trazabilidad de los productos cuando estos se dispongan a la venta final. Son elementos importantes dentro de las buenas prácticas agrícolas cuya implementación puede ser un elemento diferenciador que le permita al productor desarrollarse de forma competitiva en el mercado.

3.2. Formulación del problema

¿De qué forma las tecnologías del IoT aplicadas al monitoreo remoto de pH en agua de solución de nutrientes de un sistema de cultivo hidropónico urbano permite el aumento en la productividad de las cosechas al reducir las fuentes de contaminación como parte de la aplicación de BPA?

3.3. Preguntas auxiliares de investigación

- ¿Cómo se encuentra el sistema de medición de variables de solución de nutrientes en huertos hidropónicos urbanos?

- ¿Qué indicadores se pueden utilizar para medir la calidad de la producción de los cultivos hidropónicos urbanos?
- ¿Cuáles son los principales beneficios de la implementación de las tecnologías del IoT en la hidroponía y de qué forma éstas agregan valor a las cosechas?

3.4. Delimitación del problema

La propuesta de un sistema de visualización remota de datos de pH, como parte de la calidad de agua de solución en sistema de cultivo hidropónico, se desarrolla para un invernadero urbano de producción de cultivos hidropónicos en el área de ciudad de Guatemala, el cual se establecerá durante el transcurso de la investigación. Cuenta con las condiciones de higiene así como los recursos físicos y tecnológicos para su implementación.

La investigación se llevará a cabo en el período comprendido entre enero a octubre de 2019.

Las principales consecuencias de realizarse la investigación son:

- Generar fuentes de alimentos alternativas para abastecer la población urbana de productos frescos, sanos e inocuos.
- Incentivar el desarrollo de microempresas mediante la comercialización de productos hidropónicos de calidad.

De no realizarse la investigación se perderá la oportunidad de utilizar tecnologías de la información de bajo costo que faciliten el desarrollo de sistemas de cultivos hidropónicos sostenibles para consumo propio o comercial.

3.5. Viabilidad

Este proyecto es viable debido a que se cuenta con un espacio físico de 25 m² dentro de una residencia en ciudad de Guatemala. Cumple con las consideraciones necesarias que las buenas prácticas agrícolas recomiendan para la elección de un lugar adecuado para el establecimiento de cultivos hidropónicos urbanos; entre ellas cuenta además con acceso a servicios de energía, agua potable y cobertura de señal de las distintas compañías proveedoras de telecomunicaciones de Guatemala, para la transmisión remota de los datos de las variables a monitorear con la red celular.

Los costos que se incurran durante el desarrollo de la propuesta serán cubiertos por el investigador. Esto incluye material del sistema hidropónico y sistema de monitoreo remoto.

4. JUSTIFICACIÓN

La línea de investigación con la que se aborda el trabajo es calidad, como parte de los sistemas integrados de gestión de la Maestría de Gestión Industrial.

La importancia del desarrollo de proyectos de agricultura urbana en conjunto con las tecnologías de comunicación e información radica en lograr una producción sostenible con un mejor aprovechamiento de los recursos con el fin de abastecer la creciente y futura demanda de alimentos frescos y de calidad.

La propuesta pretende resolver la necesidad de los huertos familiares de producir hortalizas frescas, libre de enfermedades que afecten la apariencia y calidad de las cosechas y, de esta manera, motivar emprendimientos familiares para su producción y comercialización.

La principal motivación del investigador es incentivar el aprovechamiento de espacios urbanos para la producción de hortalizas mediante hidroponía y herramientas del IoT, replicables y autosostenibles.

Los beneficios que se obtienen al implementar el monitoreo remoto de la calidad de solución en cultivos hidropónicos en huertos urbanos son:

- Reducción del riesgo de posibles enfermedades transmisibles por alimentos ETAs.
- Dar cumplimiento a los distintos requerimientos fitosanitarios que exige tanto el mercado local como internacional.

- Incremento en la tasa de crecimiento de los cultivos y, por ende, la producción.
- Reducción del consumo de agua destinada para el riego y eficiencia en la aplicación de las soluciones de nutrientes.
- Aprovechamiento de áreas urbanas, como terrazas y jardines para proyectos de hidroponía debido a la cero utilización de suelo.
- Reducción del uso de pesticidas.

Los beneficiarios serán las familias consumidoras de las distintas variedades y especies de cultivos hidropónicos, cuya cosecha sea para consumo propio. Mientras que si el objetivo es comercial, tanto productor como cliente se beneficiarán al generar valor con productos alimenticios de calidad.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Proponer un sistema tecnológico mediante el uso de tecnologías del IoT que permita la visualización de forma remota del estado del nivel de pH en agua de solución en sistemas de cultivos hidropónicos urbanos, para ayudar a minimizar las fuentes de contaminación como parte de las BPA y así garantizar, rendimiento, calidad e inocuidad en las cosechas.

5.2. Específicos

- Identificar la situación del sistema de medición de variables de solución de nutrientes en huertos hidropónicos urbanos.
- Analizar los indicadores de calidad para establecer el rendimiento productivo de la cosecha de cultivos hidropónicos.
- Determinar los beneficios de la implementación de las tecnologías del IoT en la hidroponía y de qué forma estas agregan valor a las cosechas.

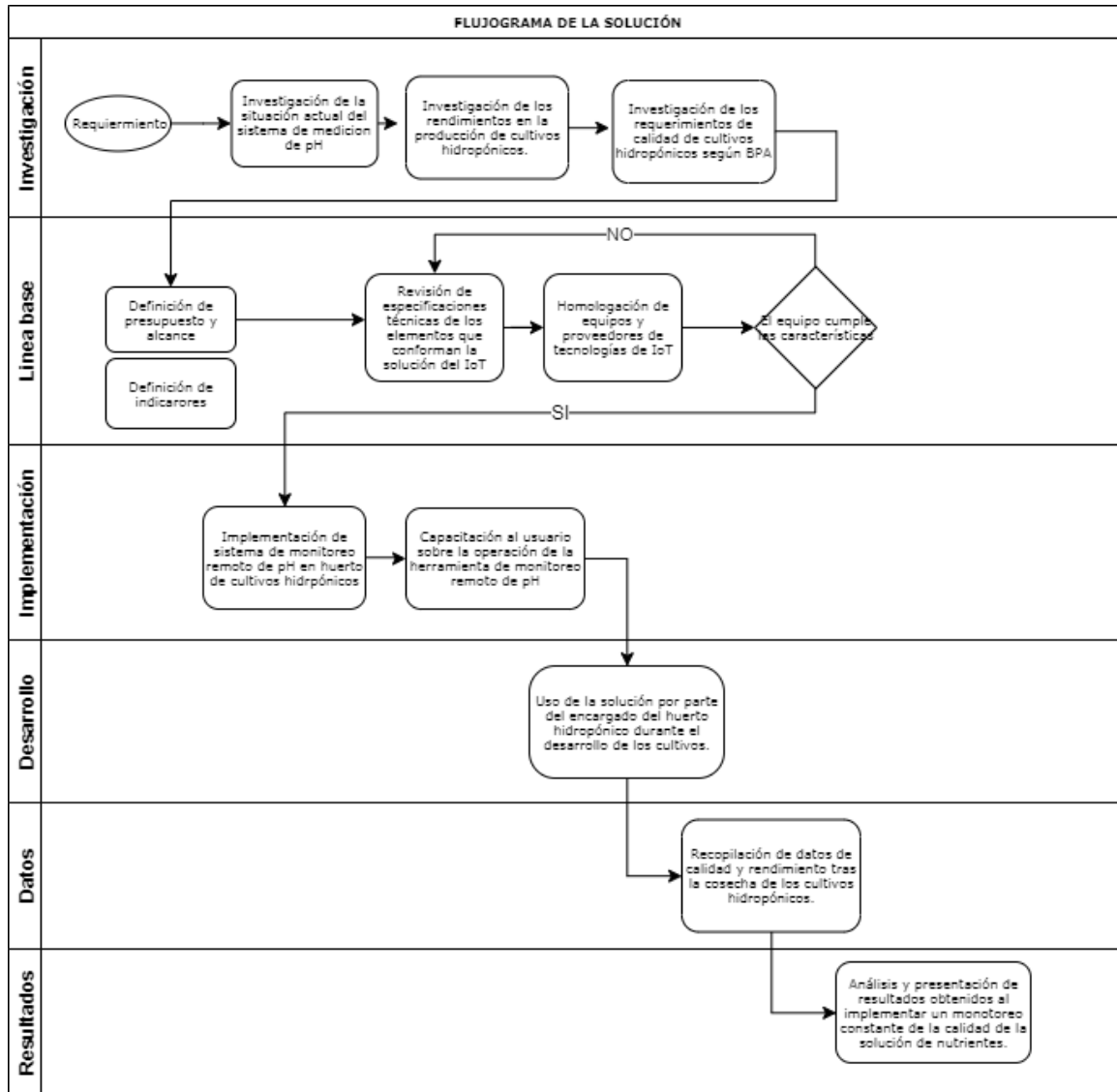
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

El proyecto busca cubrir la necesidad de los agricultores hidropónicos urbanos de monitorear de forma remota el estado de las principales variables de agua de solución, esencialmente el nivel de acidez o alcalinidad (pH) para la toma de decisiones, así como el correcto desarrollo de los cultivos hidropónicos que permitan cosechas de calidad, frescas y libres de enfermedades.

Por lo tanto, para su correcto desarrollo se plantea el siguiente esquema de solución:

- Revisión documental de las tecnologías que involucran un proyecto de IoT aplicados a un huerto hidropónico urbano.
- Diagnóstico del sistema de medición de pH en cultivos hidropónicos.
- Análisis de los indicadores de calidad y el rendimiento comercial de la cosecha de cultivos hidropónicos.
- Evaluación de los beneficios de la propuesta de IoT para la medición y monitoreo remoto de la variable de pH en agua de solución.

Figura 1. **Flujograma de la solución**



Fuente: elaboración propia.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Agricultura urbana e hidroponía

Moreno (2007) afirma que la Agricultura Urbana (AU) está conformada por el cultivo, el procesamiento, la distribución y el consumo de productos agrícolas dentro del área de una ciudad, empleando para la producción, recursos poco aprovechados como terrenos baldíos, aguas residuales tratadas, desechos reciclados y mano de obra desempleada. (p. 8)

La agricultura urbana, debido a sus características prácticas, como señala Moreno (2007):

Ayuda a mejorar la calidad nutricional de la dieta alimentaria y reduce los gastos de la canasta familiar en comunidades urbanas y periurbanas que se encuentren en condiciones de pobreza. De igual forma, puede ser utilizada por grupos socioeconómicos medios, como cultivos recreativos, de autoconsumo y de forma comercial en escala pequeña. (p.10)

Por lo tanto, en el contexto de seguridad alimentaria y economía doméstica, Moreno (2007), subraya que: “un número creciente de gobiernos locales ha reconocido el potencial que tiene la agricultura urbana y periurbana como parte de una estrategia que busque de reducir la pobreza y mejorar la seguridad alimentaria, salud y economía doméstica de grupos vulnerables” (p.15). Moreno (2007), en tal sentido: “la agricultura urbana puede ser una fuente de generación de ingresos tanto para productores hombres y especialmente mujeres, debido a los servicios, productos e insumos que giran en torno a su implementación,

además que provee una fuente de empleo para el personal contratado para la operación de microempresas relacionadas con la actividad” (p.16).

Por otro lado, Fernández, García, Esteban, Fernández, Conesa, Bañón y Ochoa (2007) expresan que: “el proceso de adaptación a las necesidades de la sociedad urbana es trascendental para entender la AU, sus potencialidades y tipos. Por lo tanto, la agricultura urbana debe ser considerada como resultado de la interacción permanente entre lo urbano y el ámbito rural, y no como un sobrante rural” (p.18).

7.1.1. Categorías de agricultura urbana

Fernández, *et al.* (2007) clasifican la agricultura urbana en tres categorías:

- Huerto urbano: está concentrado en actividades de horticultura con fines sociales y baja dependencia económica de materiales. Entre ellos se encuentran los tipos de huertos:
 - Familiares
 - Parcelados
 - Escolares o educacionales
 - Terapéuticos
 - Comunitarios
 - De movimientos colectivos de ocupación

- Agricultura urbana: entre ellas se encuentran granjas locales, granjas-escuela, granjas experimentales, granjas sociales o terapéuticas y granjas agroambientales, que ofrecen productos agrícolas o servicios basados en modelos de negocio tomando ventaja de la proximidad de la ciudad.

- Agricultura urbana no orientada: los modelos agrícolas tradicionales de zonas limítrofes a la ciudad cuyos modelos de negocio no se han adaptado a la proximidad de la ciudad.

7.1.2. Agricultura familiar

La agricultura familiar se define como “la interacción de una familia con la naturaleza, en el que se desarrollan procesos productivos agrícolas sustentables con base en sus saberes ancestrales, recursos locales e innovaciones tecnológicas para el sustento de la vida” (PAFFEC, 2017, p.8).

Según datos de PAFFEC en 2017, “La agricultura familiar provee en América Latina y el Caribe, entre 27 y 67 % de la producción alimentaria de cada país y ocupa entre el 12 y el 67 % de la superficie agropecuaria” (p.12).

PAFFEC (2017) también expone que, “cuando la agricultura familiar orienta sus actividades a los mercados e incorpora valor a los productos antes de su comercialización, se convierte en una fuente de generación de empleo directo e indirecto” (p.12).

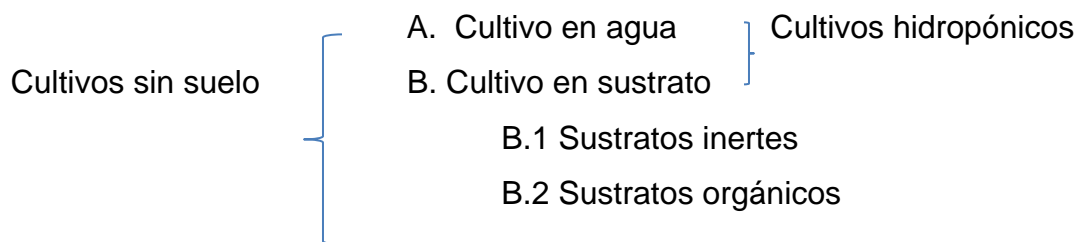
7.1.3. Conceptos de hidroponía

En el Manual de cultivos hidropónicos populares desarrollado con el apoyo de INCAP y OPS, Castañeda (1997) indica que “la palabra hidroponía significa plantar verduras y vegetales en agua o materiales distintos a la tierra y que también se le conoce como la agricultura del futuro” (p.15).

También se entiende por cultivo sin tierra, según Barros (1999), al método que provee los alimentos que requieren las plantas para su perfecto desarrollo,

no por intermedio de su vía natural, la tierra, sino que por medio de una solución sintética de agua y sales minerales diversas.

Se encuentra de forma común que los términos cultivos sin suelo e hidroponía hacen referencia a lo mismo. Para visualizar de mejor manera las diferencias se presenta el siguiente esquema, tal como lo ilustran Winsor y Schwarz (1990):



A pesar que a través del tiempo se han desarrollado distintos métodos y técnicas de cultivos hidropónicos, los fundamentos que se han establecido desde la década de los cincuenta, siguen presentes en la mayoría de los sistemas desarrollados en el presente. Andreau, Giménez y Beltrano (2015) exponen que:

Dependiendo del medio en donde se desarrollen las raíces, las plantas cosechadas sin suelo se pueden dividir en dos categorías principales: las cultivadas en agua (hidroponía), que utilizan balsas o técnicas como film nutritivo (NFT) y el cultivo en sustrato, que utilizan por ejemplo fibra de coco, turba, vermiculita, perlita, lana de roca o arena. (p.17)

7.1.3.1. Cultivo en agua

En este tipo de sistema de cultivo no se utiliza ningún elemento de anclaje sólido para instalar y sujetar a la planta y su respectiva raíz; por lo tanto, su desarrollo es completamente en la solución nutritiva (Urrestarazu, 2004).

7.1.3.1.1. Tipos de sistemas en solución o hidropónicos

Las dos categorías en que pueden clasificarse los sistemas hidropónicos simplificados, tal como lo declaran Orsini, Michelin y Gianquinto (2012), “dependen del destino del agua después del riego: los sistemas de circuito cerrado son aquellos que reciclan el agua drenada volviéndola a utilizar para un riego adicional; y los ciclos de circuito abierto son aquellos donde el exceso de agua se drena y es desechada” (p.25).

- Sistema de solución estática

Como afirman Andreau, Giménez y Beltrano (2015), en este tipo de cultivos las raíces están sumergidas en recipientes profundos con solución nutritiva, con la característica que este sistema padece de falta de oxígeno y, por ende, no es funcional para altas temperaturas.

- Sistema con solución recirculante (técnica de solución nutritiva recirculante en canales NFT)

En este tipo de sistema, la solución se encuentra en constante movimiento de forma intermitente dentro de la infraestructura de canales, lo que provoca que el aporte de oxígeno no sea crítico para su implementación.

Andreau, Giménez y Beltrano (2015) también detallan que: “el aumento de la temperatura en la solución provoca la disminución en el aporte de oxígeno a las raíces ya que el consumo se duplica con un aumento de 10 °C, mientras que la disolución del oxígeno en la solución baja de 9,6 a 7,8 mg/L para 20 y 30 °C respectivamente” (p.74).

Entre las características principales de este método para el cultivo de lechuga como lo afirman Andreau, Giménez y Beltrano (2015) se encuentran las siguientes:

- Los materiales no deben ser tóxicos para los cultivos.
 - La densidad de cultivo para la lechuga es de 8 a 24 pl/m².
 - Pendiente del canal 1,5 %.
 - Caudal de la película de solución por canal: 2 a 6 l/min.
 - Conductividad eléctrica de la solución en invierno de 0,4 a 0,6 meq/100gr y en invierno Verano 1 a 1,6 meq/100 gr.
 - pH 5,5 a 6,1 (p.74).
- Cultivos en aire o aeropónicos

Se utiliza una solución del tipo circulante, pero con la característica que las raíces se encuentran en contacto directo con el aire. Para mantener húmeda la raíz de estos sistemas se utilizan recintos y microaspersores ubicados estratégicamente que se encargan de suministrar descargas de solución nutritiva de corta duración y frecuencia variable, mientras que la solución sobrante es recolectada y llevada nuevamente al depósito de reserva. (Andreau, Giménez y Beltrano, 2015, p.82)

- Cultivos en sustratos

Andreau, Giménez y Beltrano (2015) recomiendan utilizar un sustrato distinto según dada la condición o combinación de factores del cultivo, como higiene, manejo del riego, las condiciones climáticas y el material vegetal a cultivar. Se pueden diferenciar dos grupos de sustratos según su capacidad de intercambio catiónico.

Los sustratos con alto CIC son más estables ante las variaciones del pH y conductividad eléctrica en la solución nutritiva. Entre ellos se encuentran la turba, fibra de coco y vermiculita.

Los sustratos con bajo CIC son muy perceptibles a los cambios de pH y CE. Por ejemplo perlita, arena y lana de roca.

Tabla I. **Capacidad de intercambio catiónico para diferentes sustratos.**

MATERIAL	Meq.L ⁻¹ (CIC)
TIERRA ARCILLO LIMOSA	200-300
TURBA NEGRA	200-400
TURBA RUBIA	100-200
CORTEZA DE PINO	80-120
PERLITA	5-10
ARENA	0

Fuente: Andreau, Giménez, D. y Beltrano, J. (2015). *Capacidad de intercambio catiónico (CIC) de diferentes sustratos.*

Andreau, Giménez y Beltrano (2015) clasifican los sustratos “según la capacidad de adsorción y fijación de los nutrientes. Los sustratos químicamente

inertes los cuales no intervienen y los químicamente activos, los cuales además de ser útiles para la fijación para las raíces, funcionan como depósito de agua y nutrientes que se proporcionan durante la fertilización” (p.3)

Otra clasificación de los sustratos es según el origen de los materiales, ya que estos pueden ser orgánicos o inorgánicos, artificiales o minerales.

Además, se indica que para determinar el mejor sustrato o mezcla de sustratos, se deben considerar ciertas características físicas y químicas.

Las principales características físicas que se deben analizar para elegir un buen sustrato son la porosidad, capilaridad, estabilidad física, peso, disponibilidad y bajo costo. Estas características físicas influyen en la capacidad de retener agua y humedad, así como de aireación, compactación y descomposición. Según Andreau, Giménez y Beltrano (2015) “la porosidad debería ser de aproximadamente el 25 %” (p.7).

Entre las características químicas de los sustratos se encuentra la capacidad de intercambio catiónico variable, que es “la capacidad que tiene un suelo o sustrato para retener y liberar iones positivos, lo cual afecta directamente a la cantidad y frecuencia de aplicación de fertilizantes” (Andreau, Giménez y Beltrano, 2015, p.45).

Además, se deben tomar en cuenta la capacidad de mantener constante los valores de pH, la baja salinidad y baja velocidad de descomposición.

A continuación, se muestra cómo la porosidad de diferentes elementos tiene una influencia directa con su capacidad de retención de líquido:

Tabla II. **Influencia en la porosidad y retención de agua según el tamaño de las partículas**

TAMAÑO DE PARTÍCULAS (mm)	POROSIDAD TOTAL (%)	AGUA RETENIDA CC (%)
0-1	66,4	52,2
1-2,5	78,3	28,5
2,5-4	83,3	18,6
4-8	85,4	17,5
8-10	86,7	18,5
> 10	86,7	19,4

Fuente: Andreau, Giménez, D. y Beltrano, J. (2015). *Influencia del tamaño de las partículas en la porosidad y retención de agua.*

7.1.3.2. Elementos que componen un sistema de cultivo sin suelo

Cualquier sistema de cultivo sin suelo que se desarrolle, se define por componentes básicos que son las unidades elementales de cultivo, estos pueden ser macetas, canalones, piletones, balsas, entre otros, el sustrato, el equipamiento adecuado de riego con solución nutritiva (automatismosordenadores, equipo de riego-fertirriego, etc) y la tecnología y conocimiento necesario para el correcto manejo del sistema y sus elementos. (Andreau, Giménez y Beltrano, 2015, p.76)

7.1.3.2.1. Solución nutritiva

Como describen Soria y Aguilar (2000), “la solución nutritiva está compuesta por el agua de riego y los iones disueltos procedentes de la

disolución de los abonos empleados para la formulación de dicha solución. En la solución nutritiva se encuentran disueltos en proporciones adecuada, los elementos esenciales para el desarrollo de las plantas” (p.62).

Carbone (2015) declara que “una de las claves para el éxito del cultivo hidropónico es la composición de la solución nutritiva, ya que la misma deberá contener todos los elementos mencionados en forma adecuada y en las cantidades apropiadas para que cumplan de manera correcta el rol que desempeñan en el metabolismo vegetal” (p.15).

Por lo tanto la solución nutritiva es, por definición, Carbone (2015), una solución acuosa que contiene oxígeno disuelto y todos los nutrientes minerales esenciales, necesarios para el normal crecimiento de las plantas.

Una solución nutritiva completa, como enfatizan Andreau, Giménez y Beltrano (2015), debe contener tanto macronutrientes (gr/L) como micronutrientes (mg/L). Estos elementos se le deben de proveer a las plantas en su forma más simple, que es en forma de iones, para que estas los puedan asimilar. Por lo tanto, es importante mantener un pH ligeramente ácido para que los nutrientes se mantengan disueltos.

Entre los factores que se deben de considerar en el análisis de la calidad agua en cultivos hidropónicos, según Carbone (2015) se encuentran los siguientes:

- Disponibilidad de oxígeno

Un factor clave en los cultivos sin suelo en agua es la oxigenación del medio donde las raíces interactúan y obtienen los nutrientes.

La cantidad de oxígeno presente en la solución es vital para la absorción iónica, ya que niveles bajos de oxígeno disminuye la cantidad de hierro en los sistemas NFT. Tal como destaca Carbone (2015), “El oxígeno en la solución nutritiva ayuda al correcto crecimiento y desarrollo de las raíces debido a que en un modelo aeróbico las células pueden respirar y generar energía metabólica (ATP) y en consecuencia poder absorber todos los nutrientes necesarios para el adecuado crecimiento” (p.17).

Según Zeroni (1983), el límite inferior de oxígeno disuelto recomendado para un cultivo hortícola y ornamental es de 3-4 mg L⁻¹.

Valores por debajo de este límite, como subraya Urrestarazu (2004), produce una disminución en el crecimiento radical. Se produce un característico oscurecimiento de las raíces, que es un indicador visual de fácil detección de un problema de hipoxia. Otra consecuencia puede ser el apareamiento de microorganismos no deseados, por ejemplo, *Phytium*, *Phytophthora*, entre otros.

Urrestarazu (2004), afirma que la importancia de la aireación de las raíces “se hace evidente al observar la estrecha relación entre la concentración de oxígeno disuelto en la solución nutritiva o rizosfera y la productividad del cultivo” (p.1).

Existen distintos métodos para aportar el oxígeno necesario a las raíces en cultivos en agua, entre ellos se encuentran:

- Burbujeo de aire con un compresor de aire
- Agitador
- Salto del drenaje en el tanque de recogida

- Temperatura

Debido a que las raíces de los cultivos se encuentran en contacto directo con la solución, esta debe mantener la temperatura dentro de los límites, ya que un incremento excesivo puede afectar el metabolismo molecular y causar incluso la muerte de las plantaciones. Carbone (2015) denota que “el oxígeno, esencial para la vida celular, se disuelve mejor a bajas temperaturas que en aguas calientes, y que de igual forma, un incremento en la temperatura aumenta la absorción de iones K y fosfato, así como la tasa respiratoria de las raíces” (p.43).

- Potencial de hidrógeno (pH)

El pH tiene un efecto directo en la absorción iónica de los cultivos. Tal como lo sostiene Carbone (2015), “las soluciones con $\text{pH} \geq 7,5$ producen reducción de la absorción de NO_3^- , así como del ion fosfato. Las soluciones con $\text{pH} \leq 4$ disminuye la absorción de K produciendo un desbalance en la polaridad de las membranas celulares de las raíces. Los incrementos de pH en la solución nutritiva producen la precipitación de iones, como el Fe quien ve interrumpida su normal absorción” (p.9).

El valor 7 de pH representa neutralidad. Los números en la escala aumentan con el aumento de la alcalinidad, mientras que los números en la escala disminuyen con el aumento de la acidez. Cada unidad de cambio representa un cambio diez veces mayor en la acidez o alcalinidad. El valor de pH también es igual al logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno o la actividad de iones de hidrógeno. (Sensorex, 2018, p.11)

Andreau, Giménez y Beltrano (2015) explican que la solución se debe encontrar dentro de un rango de 5,8 y 6,5; de lo contrario, la plantación presentará síntomas por deficiencia de nutrientes.

- Conductividad eléctrica

Andreau, Giménez y Beltrano (2015) definen la conductividad eléctrica (CE) como “la capacidad que tiene una solución de transportar o conducir electricidad por unidad de área. La CE se mide en S/cm² (donde S = Siemens, la unidad del sistema internacional para la conductancia) o mhos/cm” (p.23).

La conductividad eléctrica es un parámetro que se refiere a la cantidad de sales presentes en la solución, la cual debe estar en un rango de 1.8 y 2.3 mmhos/cm para no afectar la disponibilidad de nutrientes en la solución.

- Interacción entre iones

La relación entre dos nutrientes depende de la concentración de cada uno y estos pueden ser sinérgicos a bajas concentraciones, así como antagónicos a concentraciones elevadas, donde el caso más conocido de competencia en el mecanismo de absorción es el exceso de potasio, que puede provocar dificultades para absorber magnesio y calcio, causando sintomatología de deficiencias de estos elementos. (Carbone, 2015, p.14)

La relación que existe entre el nitrógeno y el fósforo está comprobada, tal como señala Carbone (2015), porque “el exceso de amonio puede incluso provocar fitotoxicidad, reflejándose de forma visual, con graves quemaduras en hojas, también disminuye el pH de la solución y origina problemas de antagonismo con otros nutrientes. El amonio no debe aportar más de un 5-10%

del N total. En invierno, se puede suprimir el amonio, ya que el N del nitrato de calcio es suficiente” (p.11).

- Salinidad

Tal como afirma Carbone (2015), “altos contenidos de sales como iones sodio y cloruro en las soluciones nutritivas, afectan de manera directa a la absorción de los nutrientes” (p.11).

Figura 2. **Efecto de la variación de nutrientes en los cultivos**



Fuente: Carbone (2015). *Nutrición mineral*.

“Para tener una referencia general del estado del sistema y su funcionamiento, es necesario un monitoreo constante de al menos una vez al día

de variables como la medición de riego aportado, pH y conductividad eléctrica” (Soria y Aguilar, 2000, p. 22).

7.1.4. Localización del huerto hidropónico urbano

Para la implementación de un HHP se puede hacer uso de cualquier espacio, que garantice la calidad e inocuidad de los cultivos. Como recomienda Castañeda (1997) en el Manual técnico de hidroponía popular, estos espacios pueden ser “dentro de centros educativos y residencias donde se disponga de un espacio, como paredes, techos, terrazas, patios, ventanas y cualquier espacio no utilizado” (p.2), siempre que se cumpla con las siguientes características:

- Que el lugar disponga de seis horas como mínimo de luz solar.
- Que no esté bajo sombra de árboles o construcciones cercanas.
- Que disponga de una fuente de agua potable cercana al huerto.
- Que se tenga espacio para el almacenamiento y preparación de los nutrientes.
- Que se disponga de los elementos necesarios para proteger el huerto de animales domésticos para evitar que lo destruyan y contaminen.
- Que esté protegido por materiales de uso agrícola, de lluvia, sol o vientos fuertes, así como posibles inundaciones.
- Que esté alejado de fuentes de contaminación como desagües, baños, letrinas o basureros.

Mientras que si objetivo es la comercialización, se debe cumplir las mismas características anteriormente mencionadas, con la excepción que se necesitará un espacio más amplio.

Afirman Marulanda e Izquierdo (2003) que la mayoría de las HHP instaladas en diferentes países tienen un área que varía entre 10-20 metros cuadrados, pero hay familias o grupos que cuentan con áreas de cultivo superiores a 200 metros cuadrados, lo que les permite comercializar su producción.

7.1.5. Ventajas y desventajas de los cultivos hidropónicos

Beltrano y Giménez (2015) mencionan algunas de las muchas ventajas de los cultivos hidropónicos:

- Cultivos libres de parásitos, bacterias, hongos y contaminación.
- Reducción de costos de producción.
- Independencia de los fenómenos meteorológicos.
- Permite producir cosechas en contra estación.
- Menos espacio y capital para una mayor producción.
- Ahorro de agua, que se puede reciclar.
- Ahorro de fertilizantes e insecticidas.
- Se evita la maquinaria agrícola (tractores, rastras, etcétera).
- Limpieza e higiene en el manejo del cultivo.
- Cultivos con mejor sanidad.
- Mayor precocidad de los cultivos.
- Alto porcentaje de automatización.
- Mejor y mayor calidad del producto.
- Altos rendimientos por unidad de superficie.
- Aceleramiento en el proceso de cultivo.

- Posibilidad de cosechar repetidamente la misma especie de planta al año.
- Ahorro en el consumo del agua.
- Productos libres de químicos no nutrientes.
- Productos con aceptación en el mercado por sus características organolépticas. (p.18)

Adicionalmente, en hidroponía, el tiempo que tarda la plantación en desarrollarse disminuye. Por ejemplo, las lechugas, que tienen en tierra un ciclo de aproximadamente 3.5 meses antes del consumo, con la técnica de raíz flotante se pueden lograr cultivos a partir de su germinación, en un tiempo de 1.5 meses.

Entre las desventajas que comúnmente se presentan para su implementación está el elevado costo inicial, lo cual puede variar dependiendo de la técnica, el tamaño del huerto, materiales y la tecnología a utilizar. También se puede presentar como barrera la idea de que se requiere de alto conocimiento de las técnicas para desarrollar la producción.

7.2. IoT en la agricultura, la agricultura inteligente

Smart Agriculture o Smart Farming, como lo manifiesta Sciforce (2019), “son conceptos que han surgido debido a la aplicación de las modernas tecnologías de la información y la comunicación al manejo de cultivos y granjas, con el objetivo de incrementar la calidad y cantidad de los cultivos, al mismo tiempo que optimiza la mano de obra humana” (p.5).

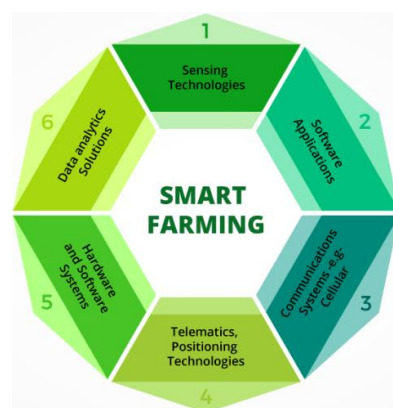
Con la agricultura inteligente, el dueño del cultivo puede monitorear el estado de los cultivos y su entorno sin necesidad de estar en campo y con esta

información tomar decisiones estratégicas para áreas específicas o toda la granja.

Entre las principales herramientas y tecnologías que se disponen para su integración e implementación en una granja inteligente, se encuentran las siguientes:

- Sensores: suelo, agua, luz, humedad, temperatura.
- Software: soluciones de software especializadas en distintos tipos de granjas o plataformas de IoT.
- Conectividad: celular, LoRa, entre otros.
- Ubicación: GPS, satélite, entre otros.
- Robótica: tractores autónomos, drones, instalaciones de procesamiento, entre otros.
- Análisis de datos: soluciones de análisis independientes, entre otros.

Figura 3. **Tecnologías utilizadas en un ecosistema de Smart Farming**



Fuente: Sciforce. (2019). *Smart Farming: The Future of Agriculture*. Recuperado de <https://www.iotforall.com/smart-farming-future-of-agriculture/>

Como describe Sciforce (2019), “la fuerza impulsora de la agricultura inteligente es el IoT, el cual conecta máquinas inteligentes y sensores integrados en las granjas para que los procesos agrícolas estén basados en los datos que se procesan y almacenan” (p.3).

La agricultura inteligente sigue un ciclo como el siguiente:

- Observación: los sensores registran datos de los cultivos, ganado, suelo o la atmósfera.
- Diagnóstico: el sensor envía los datos a una plataforma de IoT en la nube con reglas y modelos de decisión predefinidos, que determinan la condición del objeto examinado e identifican cualquier deficiencia o necesidad.
- Decisión: una vez que se revelan los problemas, el usuario y los componentes impulsados por el aprendizaje automático de la plataforma de IoT determinan si el tratamiento específico de la ubicación es necesario y, de ser así, cuál.
- Acción: luego de la evaluación y la acción del usuario final, el ciclo se repite.

Para lograr este objetivo, AdvanWISE, un impulsador y desarrollador de soluciones integradas de IoT orientado a la industria, puntualiza que, la tecnología LPWAN es la adecuada para el monitoreo del entorno; ya sea calidad del aire, suelo o agua, ya que permite tanto la conexión entre dispositivos en campo durante un período prolongado de tiempo, como enviar pequeñas cantidades de datos a largo plazo.

Las tecnologías de IoT permiten la trazabilidad de los alimentos desde que son cosechados hasta su consumo, se logra con esto mayor inocuidad, lo cual será un común denominador en la industria agroalimentaria.

En un estudio del Instituto Español de Estudios Estratégicos (2018), se propone que la agricultura de precisión es y será más frecuente, de manera que se desarrollarán aplicaciones como la previsión de plagas en cualquier plantación mediante la integración de modelos de inteligencia artificial, utilizando sensores que avisen y recomienden cuándo y cuánto insecticida es el adecuado.

Esta producción más eficiente, productiva y sostenible, basada en la precisión y optimización de los recursos, tiene un impacto directo en el medio ambiente, ya que se obtiene un uso eficiente del agua, insecticidas e insumos.

7.2.1. Internet de las cosas IoT

En 2011, Evans y Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG) exponen que “las raíces de IdC se pueden remontar al Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), hasta llegar al trabajo del Auto-ID Center. Este grupo, fundado en 1999, realizaba investigaciones en el campo de la identificación por radiofrecuencia en red (RFID) y las tecnologías de sensores emergentes” (p.2).

Rose, Eldridge, Chapin y la Internet Society (ISOC) (2015), señalan específicamente que el término IoT o idC, “fue empleado por primera vez en 1999 por el pionero británico Kevin Ashton para describir un sistema en el cual los objetos del mundo físico se podían conectar a Internet por medio de sensores” (p.5).

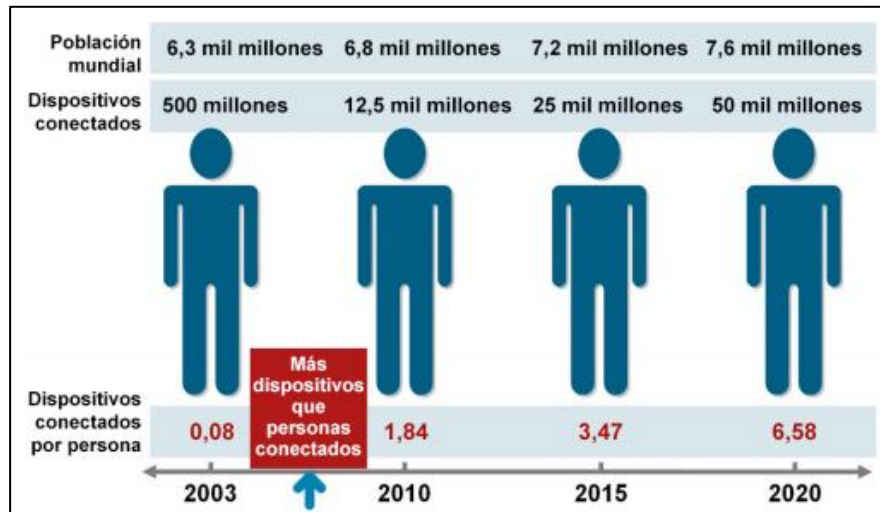
Como lo expresa Rose, *et al.* (2015), “el término internet de las cosas (IoT), no posee una definición establecida y cada definición no necesariamente son contradictorias, sino que más bien enfatizan diferentes aspectos del este fenómeno desde diferentes puntos de vista y casos de uso” (p.5). Rose, *et al.* (2015) sostiene que:

Se refiere a la ampliación de la conectividad de red y la capacidad de cómputo a objetos, dispositivos, sensores y elementos que habitualmente no se consideran computadoras y que requieren una mínima intervención humana para generar, intercambiar y consumir datos; los cuales muchas veces tienen conectividad con capacidad de recolección remota, análisis y gestión de datos. (p.18)

Hay que tomar en cuenta también que, la Internet los datos que se intercambian entre objetos inteligentes no necesariamente deben incluir modelos de redes y comunicaciones que utilizan Internet, ni puertas de enlace con conectividad a redes basadas en IP o que se incorporarán de alguna forma a características de productos accesibles a través de Internet. (Society, 2015, p.18)

Por otro lado, la definición que IBSG le da al internet de las cosas, es a ese momento en el tiempo en que hubo más “cosas u objetos” conectados a Internet que personas, y esto sucedió en entre 2008 y 2009, tal como lo muestra la siguiente gráfica:

Figura 4. Internet de las cosas "nació" entre los años 2008 y 2009



Fuente: Cisco IBSG, (2011). *Índice de dispositivos conectados según estudio de CISCO*. Recuperado de https://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf

Para el cálculo se toma en cuenta a la población mundial total y no el segmento de la población que aún no se encuentra conectada a internet.

A pesar de que no se tenga una definición generalizada para el término IoT, hay que enfatizar que se trata de un tema emergente que promete transformar el modo en que vivimos, con suma importancia en lo técnico, social y económico,

La importancia del IdC radica en que se trata de la primera evolución real de Internet (un salto que conducirá a aplicaciones revolucionarias con el potencial de mejorar drásticamente la manera en que las personas viven, aprenden, trabajan y se entretienen). IdC ya ha logrado que Internet sea sensorial (temperatura, presión, vibración, luz, humedad, estrés), lo que nos permite ser más proactivos y menos reactivos. (Evans e IBSG, 2011, p.6)

En este contexto, según Evans e IBSG (2011), entiéndase internet como “la capa física compuesta de *switches*, *routers* y otros equipos, encargada de transportar información de un punto a otro, de manera rápida, confiable y segura” (p.111).

Evans e IBSG (2011) también destacan que “existe una correlación directa entre la entrada (datos) y la salida (sabiduría). Cuántos más datos se generan, más conocimiento y sabiduría pueden obtener las personas. IdC aumenta drásticamente la cantidad de datos que están disponibles para que los procesemos” (p.5).

Se debe tener presentes los retos que el IoT conlleva en la vida cotidiana, ya que para su desarrollo, como afirman Evans e IBSG (2011), “se deben tomar en cuenta aspectos importantes tales como la implementación de IPv6, la energía para alimentar los sensores y el acuerdo sobre las normas” (p.18).

Adicionalmente, Rose, *et al.* (2015) señalan que el IoT “plantea importantes desafíos que podrían dificultar la realización de sus potenciales beneficios, entre ellos se incluyen la seguridad; la privacidad; la interoperabilidad y los estándares; cuestiones legales, reglamentarias y relacionadas con los derechos; economías emergentes y cuestiones relacionadas con el desarrollo” (p.4).

En el contexto del desarrollo de esta investigación y la importancia del tema de IoT, en 2015, Rose, Eldridge, Chapin y la Internet Society (ISOC) establecen que la tecnología de la IoT “ofrece la posibilidad de transformar la agricultura, la industria y la producción y distribución de energía mediante el aumento de la disponibilidad de información a lo largo de la cadena de valor de la producción por medio de sensores conectados en red” (p.33).

7.2.1.1. Modelos de comunicación del IoT

En el documento Request for Comments (RFC 7452) del Comité de Arquitectura de Internet (IAB) (2015), se dictan las guías para la implementación de redes de dispositivos inteligentes y se describen cuatro modelos utilizados comúnmente para la comunicación entre elementos del IoT.

- Modelo de comunicación Device-to-Device

Rose, *et al.* (2015) explican que “el modelo de comunicación dispositivo a dispositivo representa dos o más dispositivos que se conectan y se comunican directamente entre sí y no a través de un servidor de aplicaciones intermediario” (p.45).

Estos dispositivos se comunican sobre varios tipos de redes, sean estas redes IP o internet, pero para la comunicación directa entre dispositivos, muchas veces se utilizan estándares de nivel físico de redes inalámbricas de radio de baja potencia como *bluetooth*, Z-Wave o IEEE 802.15.4 ZigBee.

Figura 5. Modelo de comunicación Device-to-Device



Fuente: Tschofenig, H., ARM Ltd., Arkko, J., Thaler, D., McPherson, D., e Internet Architecture Board (IAB), (2015). *Architectural Considerations in Smart Object Networking*.

Recuperado de <https://tools.ietf.org/html/rfc7452>

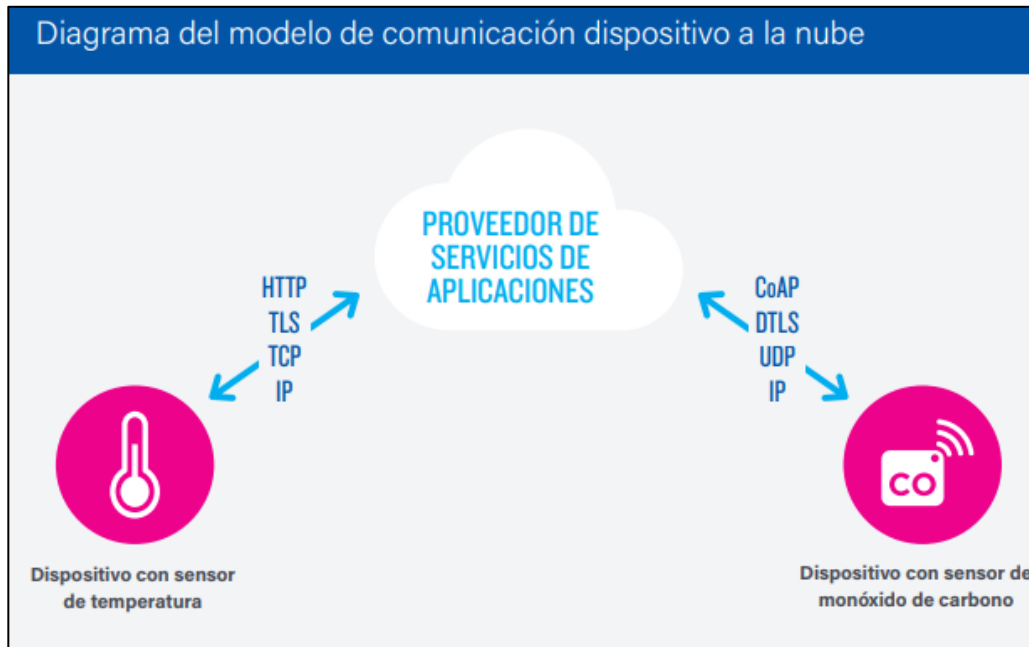
- Modelo de comunicación Device-to-Cloud

En el modelo de comunicación de dispositivo a la nube, el dispositivo de la IoT se conecta directamente a un servicio en la nube, como por ejemplo un proveedor de servicios de aplicaciones para intercambiar datos y controlar el tráfico de mensajes. Este enfoque suele aprovechar los mecanismos de comunicación existentes (por ejemplo, las conexiones de radio de uso común como Wi-Fi o Ethernet cableadas tradicionales) para establecer una conexión entre el dispositivo y la red IP, que luego se conecta con el servicio en la nube. (Rose, *et al.*, 2015, p.23)

Dentro de las limitaciones que presenta este esquema se encuentra la dependencia a la infraestructura de determinado proveedor, ya que puede surgir la necesidad que dispositivos de terceros también se conecten a la infraestructura del servidor, o que el cambio en el modelo de negocio (o quiebra) del dispositivo / servicio de IoT, podría hacer que el hardware se vuelva inutilizable.

Por lo tanto, Tschofenig, *et al.* (2015) exponen que la interfaz de protocolo utilizada para comunicarse con la infraestructura del servidor debe estar disponible y pueden implementarse varios estándares como CoAP, Datagram Transport Layer Security (DTLS) (DTLS), UDP, IP, entre otros.

Figura 6. **Modelo de comunicación Device-to-Cloud**

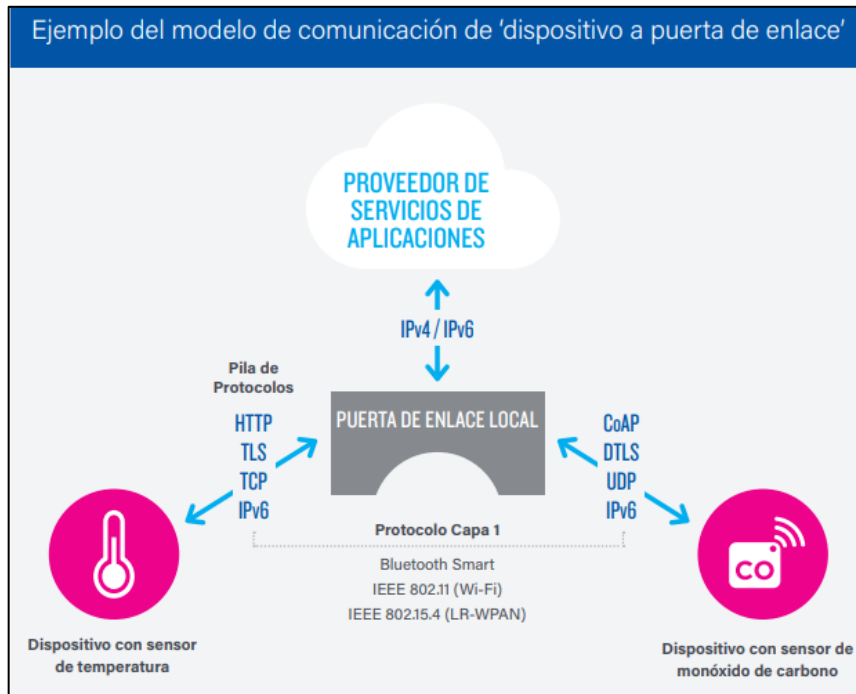


Fuente: Tschofenig, H., ARM Ltd., Arkko, J., Thaler, D., McPherson, D., e Internet Architecture Board (IAB), (2015). *Architectural Considerations in Smart Object Networking*. Recuperado de <https://tools.ietf.org/html/rfc7452>

- **Modelo de comunicación Device-to-Gateway**

El dispositivo de la IoT se conecta a través de un servicio de capa de aplicación ALG como una forma llegar a un servicio en la nube. En el dispositivo de puerta de enlace local hay un software de aplicación corriendo, que actúa como intermediario entre el dispositivo y el servicio en la nube y provee seguridad y otras funcionalidades tales como traducción de protocolos o datos. (Rose, *et al.*, 2015, p.20)

Figura 7. **Modelo de comunicación Device-to-Gateway**



Fuente: Tschofenig, H., ARM Ltd., Arkko, J., Thaler, D., McPherson, D., e Internet Architecture Board (IAB), (2015). *Architectural Considerations in Smart Object Networking*. Recuperado de <https://tools.ietf.org/html/rfc7452>

Tschofenig, *et al.* (2015) declaran que “con frecuencia se puede encontrar con implementaciones de objetos inteligentes que requieren capacidades de configuración remota e interacciones en tiempo real, por lo que la puerta de enlace debe estar conectada a Internet.” (p.18). Este modelo de comunicación se suele utilizar, como sostienen Rose, *et al.* (2015):

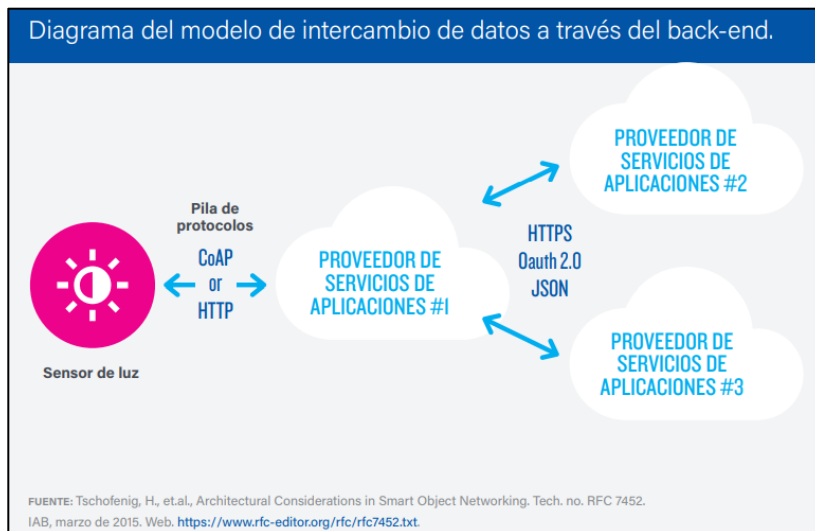
Para integrar nuevos dispositivos inteligentes en un sistema heredado con dispositivos que no son interoperables de forma nativa. Una desventaja de este enfoque es el costo y la complejidad que implican el desarrollo del software y el sistema para la puerta de enlace de capa de aplicación. (p.22)

- Modelo de comunicación Back-End Data Sharing

En este modelo, Rose, *et al.* (2015) se refieren a “una arquitectura de comunicación que permite que los usuarios exporten y analicen datos de objetos inteligentes de un servicio en la nube en combinación con datos de otras fuentes” (p.5).

Debido a que los usuarios a menudo exigen la capacidad de poder exportar y analizar datos junto con datos de otras fuentes, Tschofenig, *et al.* (2015) indican que “para lograr la interoperabilidad de los datos de dispositivos inteligentes alojados en la nube, se requiere un enfoque de interfaces de programación de aplicaciones (APIs) en combinación con servicios con tecnología de autorización y autenticación federada (como OAuth 2.0)” (p.13).

Figura 8. **Modelo de comunicación Back-End Data Sharing**



Fuente: Tschofenig, H., ARM Ltd., Arkko, J., Thaler, D., McPherson, D., e Internet Architecture Board (IAB), (2015). *Architectural Considerations in Smart Object Networking*.

Recuperado de <https://tools.ietf.org/html/rfc7452>

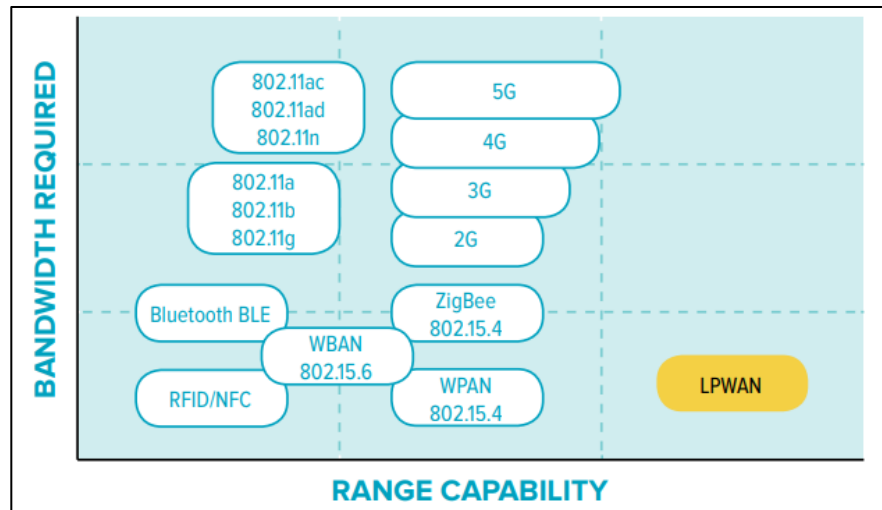
Teniendo presente los diferentes esquemas de comunicación que existen en el internet de las cosas, se opta para la presente investigación por un modelo dispositivo - puerta de enlace. El dispositivo se refiere al sensor de pH, el cual se comunica por una red de radio de largo alcance con LoraWAN hacia un gateway encargado de gestionar múltiples nodos y que, a la vez, mediante la programación visual de Node-RED, se envían los datos hacia un Publisher mediante MQTT IP. Los conceptos se presentan a continuación.

7.2.2. Redes de área amplia de baja potencia – LPWAN

Link Labs, Inc (2016) asegura que LPWAN es una buena opción cuando se requiere enviar pequeñas cantidades de datos, ya que las aplicaciones de IoT frecuentemente envían entre 20 a 256 bytes por mensaje varias veces al día. LPWAN también posee un alcance más largo que el proporcionado por las tecnologías heredadas y mantiene una duración de la batería muy larga, que a menudo es de entre cinco a 10 años. Los ejemplos de aplicación incluyen la medición de agua en grandes áreas, detectores de gas, agricultura inteligente y las cerraduras de puertas y puntos de control de acceso equipados con baterías.

En las redes inalámbricas LPWAN, dependiendo de la tecnología implementada, los nodos finales pueden estar a hasta 10 kilómetros de la puerta de enlace y transmitiendo con bajo ancho de banda a tasas de menos de 5,000 bits por segundo. Estas características, como se observa en la figura 9, no son compatibles con las tecnologías existentes:

Figura 9. **Ancho de banda contra rango de cobertura de redes inalámbricas**

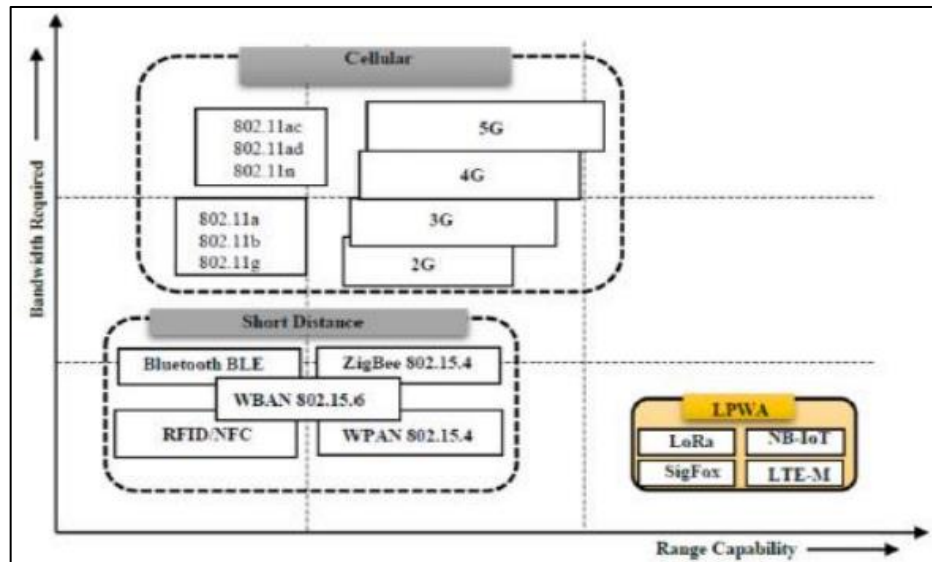


Fuente: Egli, P., (2016). *An Introduction To Mqtt, A Protocol For M2m And Iot Applications*.
 Recuperado de http://www.indigoo.com/dox/wsmw/1_Middleware/MQTT.pdf

7.2.2.1. Plataformas y tecnologías basadas en LPWAN

Tal como se demuestra en el siguiente gráfico, dentro de la tecnología LPWAN existen distintas plataformas, proveedores y desarrollos, uso de tecnologías LTE o celular tradicional, así como protocolos libres y privados.

Figura 10. **Ancho de banda requerido contra capacidad de rango de corta distancia, celular y LPWA**



Fuente: Madhumitha, M., Nikhil, N., Bhupendra, P., & International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, (2019). *Required bandwidth vs. range capacity of short distance, cellular, and LPWA. A survey on LPWAN technologies in content to IoT applications*. Recuperado de www.ijariit.com

7.2.2.1.1. Sigfox

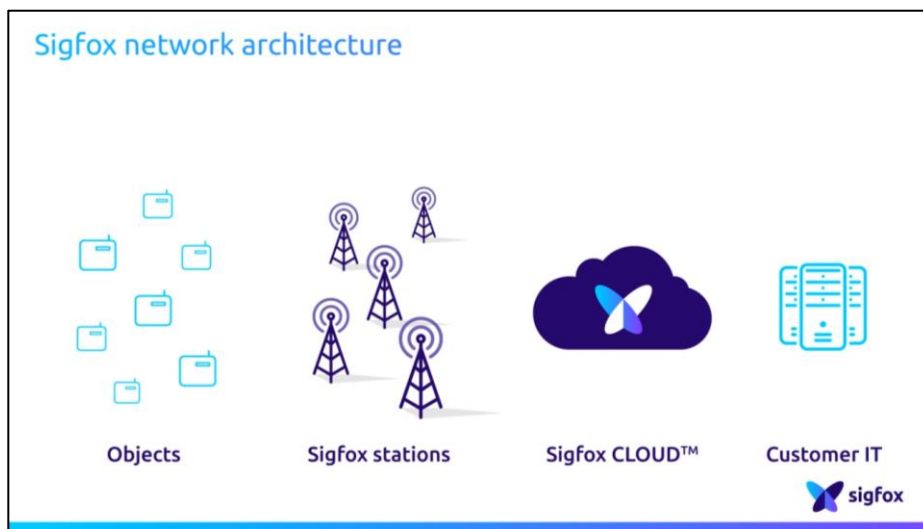
Esta tecnología utiliza una modulación de banda ultra estrecha que opera en la frecuencia de la banda pública de 200 kHz para intercambiar mensajes de radio por aire. Sigfox (s.f.) apunta que “cada mensaje tiene un ancho de banda de 100 Hz y se transfiere a una velocidad de datos de 100 o 600 bits por segundo, según la región. Por lo tanto, se pueden lograr largas distancias al mismo tiempo que son muy resistentes al ruido” (p.25).

Link Labs, Inc (2016) subraya que Sigfox instala antenas en torres (como una compañía de teléfonos celulares) y recibe transmisiones de datos desde dispositivos como sensores de estacionamiento o medidores de agua.

Sigfox ofrece perfiles de tráfico limitados; por lo tanto, está dirigido a dispositivos muy simples y aplicaciones que necesiten enviar pequeñas y poco frecuentes cantidades de datos como sistemas de alarma básicos, monitoreo de ubicación y mediciones simples. Son algunos de los sistemas de una sola vía que podrían tener sentido para esta red.

Sigfox utiliza una topología estrella, en donde el dispositivo no está conectado a una estación base específica, a diferencia de los protocolos celulares, sino que el mensaje emitido es recibido por cualquier estación base que se encuentre en el rango, que en promedio es 3.

Figura 11. **Arquitectura de red Sigfox**



Fuente: Sigfox. (s.f.). *Sigfox Technology Overview*, (2019), Recuperado de <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview>

Symphony Link es la solución LPWAN de Link Labs compatible con el estándar LoRa Alliance; utiliza LoRa PHY (capa física), pero no la arquitectura estándar de LoRaWAN MAC. Tiene un alcance 100 veces mayor que el de wifi y como en casi todas las soluciones LPWAN, es mucho más rentable que las redes celulares.

La puerta de enlace Symphony Link, según LinkLabs (s.f), “es una estación base de ocho canales por debajo de los GHz y los módulos transductores operan en la banda ISM de 915 MHz, certificados por ETSI para su uso en la banda de 868 MHz, lo que los hace flexibles para implementación con licencia o sin licencia de 150 MHz a 1 GHz” (p.2).

7.2.2.1.2. Weightless

Link Labs, Inc (2016) expone que weightless es un estándar abierto enfocado en alcanzar un estándar global mediante la innovación en el software abierto. El protocolo puede operar tanto en licencia libre como en espectro licenciado por debajo de 1GHz. Existen tres estándares abiertos de LPWA propuestos por la Weightless Special Interest Group, cada uno con características, rango y consumo de energía diferentes.

En 2017, Raza, Kulkarni y Sooriyabandara establecen que Weightless-W es compatible con varios esquemas de modulación, incluida la modulación de amplitud en cuadratura 16 (16-QAM), BPSK diferencial (DBPSK) y una amplia gama de factores de propagación, y que “dependiendo del presupuesto del enlace, los paquetes que tienen tamaños en más de 10 bytes pueden transmitirse a una velocidad de entre 1 kbps y 10 Mbps” (p.16).

Link Labs, Inc (2016), por otro lado, estipula que “a pesar que se ejecuta fuera del espectro de TV no utilizado, tiene algunos inconvenientes como una vida útil de la batería más corta (tres a cinco años) y un mayor costo tanto para el terminal como para la red” (p.28).

Raza, Kulkarni y Sooriyabandara (2017) resalta también que Weightless-N es un estándar de UNB para la comunicación de una sola vía desde los dispositivos finales a una estación base, para lograr así una eficiencia energética significativa y un menor costo que los otros estándares de Weightless. Utiliza el esquema de modulación DBPSK en bandas SUB-GHZ. Sin embargo, la comunicación unidireccional limita el número de casos de uso para Weightless-N.

Por último, Raza, Kulkarni & Sooriyabandara (2017), expresan que Weightless-P combina conectividad bidireccional con dos capas físicas no propietarias. Modula las señales utilizando GMSK y Quadrature Phase Shift Keying (QPSK). Cada canal estrecho de 12.5 kHz en la banda ISM de SUB-GHZ ofrece una velocidad de datos en el rango entre 0.2 kbps y 100 kbps. Entre las ventajas que ofrece son las capacidades de comunicación bidireccional que permiten actualizaciones de firmware por aire.

7.2.2.1.3. Nwave

Como se manifiesta en un estudio reciente de Brown y Lux Research Inc., (s.f.), la compañía Nwave es una de las mayores proponentes comerciales de la tecnología Weightless.

Nwave opera en una radio de banda ultra estrecha (UNB), que funciona por debajo de 1 GHz en bandas ISM. Al igual que Link Labs, opera una topología en estrella, lo que permite la comunicación directa de la estación base.

Brown y Lux Research Inc. (s.f.) indican que también existen desarrollos en las redes celulares tradicionales que están mejorando su idoneidad para aplicaciones de IoT, tales como el LTE de bajo consumo y bajo ancho de banda como LTE-MTC, NB-LTE-M y NB-IoT (conocido como CAT -M1 y CAT-M2).

Mientras la red celular tradicional (2G, 3G y 4G LTE) sigue siendo la más adecuada para aplicaciones de mayor ancho de banda y no es tan rentable como LPWAN para una gran cantidad de casos de uso de IoT.

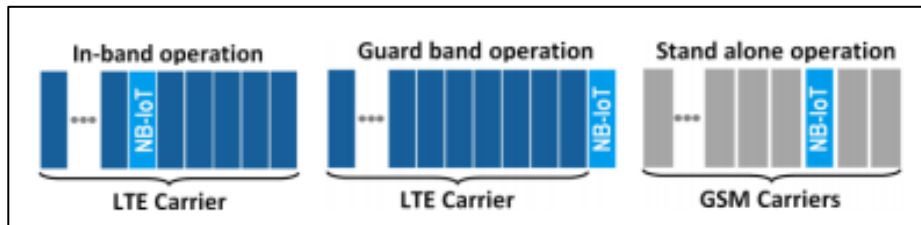
7.2.2.1.4. NB-IoT

Internet de las cosas de banda estrecha (NB-IoT), como enfatiza Madhumitha et al., (2019) es uno de los tres acuerdos, junto con EC-GSM-IoT y eMTC, que enmarcan el Cellular-IoT (C-IoT) de 3GPP, en espera de la mejora.

Mekki, Bajic, Chaxel y Meyer (2018) también remarcan que NB-IoT opera a una frecuencia de 200 KHz, la cual que corresponde a un bloque de recursos en la transmisión GSM y LTE. Por lo tanto, puede coexistir tanto en LTE como GSM con los siguientes modos de operación:

- Operación independiente: un posible escenario es la utilización de las bandas de frecuencias GSM.
- Operación de la banda de guarda: con los bloques de recursos no utilizados en la banda de guarda del operador de LTE.
- Operación en banda: con bloques de recursos en el operador LTE.

Figura 12. **Modos de operación NB-IoT**



Fuente: Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., y Meyer, F., (2018). *Operation modes for NB-IoT*. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/percomw.2018.8480255>

NB-IoT reutiliza varios principios y componentes básicos de las capas de protocolo superior y físico de LTE y permite la conectividad de más de 100K dispositivos por celda, el cual podría incrementarse explotando múltiples portadores de NB-IoT. Emplea la modulación QPSK, en el enlace ascendente el acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA) y el FDMA ortogonal (OFDMA) en el enlace descendente.

La tasa máxima de rendimiento es de 200 kbps y 20 kbps en el enlace descendente y ascendente, respectivamente. Las tecnologías NB-IoT y LTE-M pueden alcanzar 10 años de vida útil de la batería al transmitir en promedio 200 bytes por día.

7.2.2.1.5. **LoRa®**

LoRa® es la capa física o la modulación inalámbrica utilizada para crear el enlace de comunicación de largo alcance. Muchos sistemas inalámbricos heredados utilizan la modulación de cambio de frecuencia (FSK) como capa física porque es una modulación muy eficiente para lograr una baja potencia. LoRa® se basa en la modulación chirp spread, que posee las

mismas características de baja potencia que la modulación FSK pero aumenta significativamente el rango de comunicación". (LoRa® Alliance Technical Marketing Workgroup, 2015, p.5).

LoRa® es una modulación de radio de espectro ensanchado, patentada en 2013 (EP2763321) y en 2008 (US7791415), fue desarrollada por Cycleo (Grenoble, Francia) y adquirida por Semtech en 2012.

LoRa® es la abreviación de "Long Range", que también resume la ventaja clave de esta tecnología inalámbrica. En el modelo OSI estaría en la capa física utilizando una amplia gama de frecuencias que van de 137 MHz a 1020 MHz. Prajzler y LORIOT (2015) denotan que "este rango incluye numerosas bandas ISM sin licencia, como 169 MHz, 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz. Este es un elemento clave para implementaciones e interoperabilidad de bajo costo en todo el mundo". En 2015, LoRa® Alliance Technical Marketing Workgroup plantea que:

La ventaja de LoRa® se encuentra en la capacidad de largo alcance de la tecnología ya que una única puerta de enlace o estación base puede cubrir ciudades enteras o cientos de kilómetros cuadrados. El rango depende en gran medida del entorno o de las obstrucciones en una ubicación determinada, pero LoRa® y LoRaWAN™ tienen un presupuesto de enlace (link budget) mayor que cualquier otra tecnología de comunicación estandarizada. (p.6)

Con LoRa®, los dispositivos con un buen enlace a una puerta de enlace, entorno con poco ruido y línea de visión sin obstrucciones, pueden alcanzar velocidades de datos de hasta 11 kbps y ahorrar batería. Los dispositivos con una calidad de enlace deficiente pueden aumentar el *link budget* al utilizar tasas

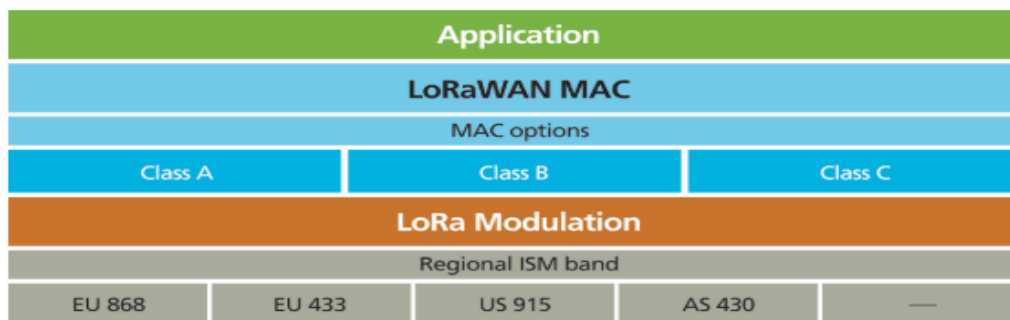
de datos más bajas, lo que extiende el alcance del enlace a más de 30 km en línea vista.

7.2.3. Especificación LoraWAN

LoRaWAN en el modelo OSI, correspondería a la capa MAC, el cual es un estándar abierto de LPWAN de alta capacidad, largo alcance y bajo consumo de energía para redes IoT de nodos LoRa. Mantenido por la LoRa Alliance, el estándar aprovecha las características de LoRa, optimiza la duración de la batería, la calidad de servicio para los nodos de LoRa y garantiza la interoperabilidad de las diversas redes de LoRaWAN en todo el mundo. (Prajzler y LORIoT, 2015, p.3)

La especificación define los parámetros de la capa física de dispositivo a infraestructura (LoRa®) y el protocolo (LoRaWAN) y, por lo tanto, proporciona una interoperabilidad entre los fabricantes.

Figura 13. Protocolo LoRaWAN (Semtech)



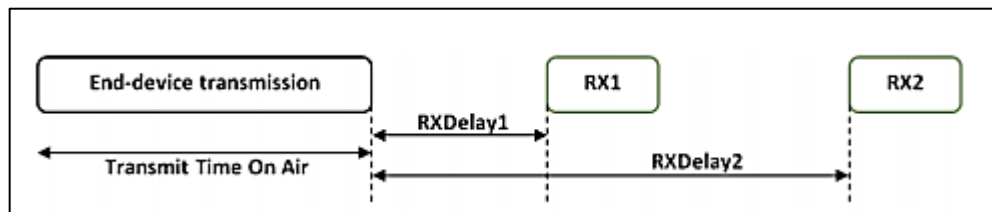
Fuente: Semtech, (s.f.). *What is LoRa®? | Semtech LoRa Technology*. Recuperado de <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>

El protocolo es totalmente bidireccional, lo que permite entrega de mensajes confiable (confirmaciones). Incluye la definición de cifrado *End to end* para seguridad y privacidad de los datos, registro vía aérea de los nodos finales y la capacidad de multidifusión.

Mekki, Bajic, Chaxel y Meyer (2018) afirman que para abordar las diferentes latencias en las aplicaciones de IoT, LoRaWAN define múltiples clases de comunicación:

- Clase A (dispositivos finales bidireccionales): la transmisión del enlace ascendente de cada dispositivo final es seguida por dos espacios cortos destinados para la recepción del mensaje de enlace descendente:

Figura 14. **Comunicación bidireccional entre dispositivo final y estación base para LoRaWAN clase A**



Fuente: Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., y Meyer, F., (2018). *Operation modes for NB-IoT*. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/percomw.2018.8480255>

En esta clase se tiene un sistema de dispositivo final con la potencia más baja para aplicaciones de IoT, como declara Mekki, et al. (2018), “solo requiere de un enlace de comunicación descendente corto después de que el dispositivo final haya enviado un mensaje de enlace ascendente. La transmisión del enlace

descendente en cualquier otro momento tendrá que esperar hasta el siguiente mensaje de enlace ascendente que envíe el dispositivo final” (p.3).

- Clase B (dispositivos finales bidireccionales con espacios de recepción programadas): además de los espacios de recepción aleatorios que tiene la clase A, en los dispositivos de la clase B, Mekki, *et al.* (2018) sostiene que “abren ventanas de recepción adicionales en horarios programados tras una sincronización de tiempo desde la estación base. Esto permite que el servidor sepa cuándo está escuchando el dispositivo final” (p.33).
- Clase C (dispositivos finales bidireccionales con lapsos de recepción máximas): las ventanas de recepción de los dispositivos finales son abiertas de forma continua. Esta clase consume energía excesiva y se define para aplicaciones de IoT con recursos de energía de energía continua.

En lo referente a seguridad, la especificación LoRa Alliance define para LoRaWAN las siguientes dos capas de criptografía:

- Una clave de sesión de red única de 128 bits compartida entre el dispositivo final y el servidor de red.
- Una clave única a nivel de aplicación para la sesión de aplicación, de 128 bits (AppSKey) compartida de punto a punto.

7.2.3.1. Banda ISM

Las bandas de radio industriales, científicas y médicas (ISM) son frecuencias reservadas internacionalmente para el uso de radiofrecuencia (RF)

con otros fines distintos de las telecomunicaciones, como el industrial, científico y médico.

En 2017, Ofcom establece que “cualquier equipo de comunicaciones que opere en las bandas de frecuencia designadas para el uso de ISM, debe tolerar cualquier interferencia generada por las aplicaciones de ISM y los usuarios no tienen protección reglamentaria contra la operación del dispositivo ISM” (p.2).

Según la Ley General de Telecomunicaciones de Guatemala, la clasificación de las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico es la siguiente:

- Bandas de frecuencias para radioaficionados: bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico que pueden ser utilizadas por radioaficionados, sin necesidad de obtener derechos de usufructo.
- Bandas de frecuencias reservadas: bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico destinadas para uso de los organismos y entidades estatales.
- Bandas de frecuencias reguladas: bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico que no se contemplan en esta ley como bandas para radioaficionados o reservadas. Solo podrán utilizarse adquiriendo previamente los derechos de usufructo. (p.82)

Figura 15. **Las tres son bandas reguladas para Guatemala. (SIT)**



Fuente: Superintendencia de Telecomunicaciones de Guatemala, Gerencia de Regulación de Frecuencias y Radiodifusión, (2016). *Tabla nacional de atribución de frecuencias radioeléctricas*. Recuperado de <https://sit.gob.gt/download/tabla-nacional-de-atribucion-de-frecuencias-radioelectricas-publicada/?wpdmdl=4341&refresh=5e67d6c0671261583863488>

En 2018, Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., establece que la especificación LoRaWAN relaciona los parámetros que deben cumplirse para cada región. La tabla de compatibilidad a continuación muestra las áreas compatibles con las versiones de LoRaWAN:

Tabla III. **Compatibilidad de frecuencias LoRaWAN según la región**

Region	Supported by
EU 863-870 MHz ISM Band (Europe)	LoRaWAN EU
US 902-928 MHz ISM Band (United States)	LoRaWAN US
CN 779-787 MHz ISM Band (China)	Not supported
AU 915-928 MHz ISM Band (Australia)	LoRaWAN AU
CN 470-510 MHz ISM Band (China)	Not supported
AS 923 MHz ISM Band (ASEAN)	LoRaWAN ASIA-PAC / LATAM
KR 920-923 MHz ISM Band (South Korea)	Not supported
INDIA 865-867 ISM Band (India)	LoRaWAN IN

Fuente: Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., (2018). *Regional compatibility table Waspote LoRaWAN Networking Guide*. Recuperado de <http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspote-lorawan-networking-guide.pdf>

7.2.3.2. Configuración de red

Las principales tecnologías LPWAN implementan una topología en forma de estrella, similar al wifi, en donde los puntos finales están conectados directamente al punto de acceso.

A diferencia de la topología mesh como la que implementa ZigBee, en donde se tienen presupuestos de enlace limitados debido a las altas tasas de datos y la baja sensibilidad del receptor, en una red estrella se pueden añadir repetidores para tener una mejor cobertura, lo cual, para varias de las aplicaciones, es un bien aceptado en términos de latencia, confiabilidad y cobertura. Además, como las estaciones base están siempre encendidas, se garantiza el acceso inmediato a los dispositivos finales conectados.

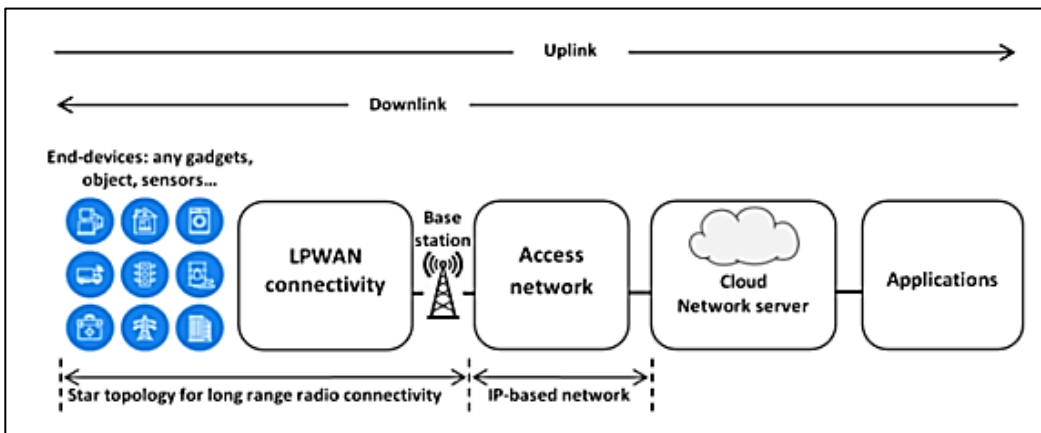
Adicionalmente, como expresa Link Labs Inc (2016), algunas conexiones ZigBee tienen problemas para enviar datos a más de 20-30 metros de distancia porque la energía que proviene del transmisor se pierde demasiado rápido.

En 2018, Mekki, Bajic, Chaxel y Meyer distinguen que las dos formas de comunicación en la topología estrella son *uplink* y *downlink*. En la transmisión *uplink* el dispositivo final envía mensajes hacia las estaciones base. Al recibir un mensaje, las estaciones base lo reenvían al servidor backend (el servidor de red) utilizando una red basada en IP. El servidor de red comprueba la autenticación / autorización de mensajes y la reenvía al servidor de aplicaciones.

LPWAN se diseñó en sus inicios solo para transmisión de enlace uplink pero la transmisión de enlace downlink también está disponible en Sigfox, LoRaWAN y NB-IoT. Para la transmisión del enlace downlink, el servidor de aplicaciones

envía un mensaje al servidor de red y este lo renvía a la estación base correspondiente, que luego lo envía al dispositivo final.

Figura 16. **Topología de red para implementación de IoT con Sigfox, LoRaWAN o NB-IoT**



Fuente: Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F., (2018). *Network topology of IoT deployment using Sigfox, LoRaWAN, or NB-IoT*. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/percomw.2018.8480255>

La clave de las nuevas redes de telecomunicación inalámbricas es el espectro radioeléctrico y el uso de bandas no licenciadas, conocidas como bandas ISM (Industrial Scientific and Medical). Sin embargo, su uso está masificado y por consiguiente, el nivel de potencia interferente puede llegar a ser muy elevado, expresa Carvera (2005).

En el área de la agricultura, debido a que las condiciones del ambiente no cambian radicalmente, los dispositivos actualizan los datos sensados pocas veces al día en comparación a otras aplicaciones. Es por esto que Sigfox y LoRaWAN son ideales para esta aplicación.

Adicional a esto, existen áreas rurales no cuentan con cobertura celular de LTE, por lo que la nube NB-IoT no se proyecta como una solución agrícola en el futuro.

7.2.4. Protocolos y plataformas IoT

En un estudio reciente, Dolui y Politecnico Di Milano (2017) destacan que las plataformas de IoT cumplen con tres servicios básicos: almacenamiento, procesamiento y acceso remoto a los datos. También indica que existen dos formas de comunicación entre el gateway y la plataforma, basadas en el modelo de mensajería. Estas pueden ser protocolos de solicitud-respuesta y los protocolos de paso de mensajes.

En el modelo solicitud-respuesta, se definen dos participantes principales: cliente y servidor. Entre los principales protocolos de este tipo se encuentra Hyper Text Transfer Protocol (HTTP) y Constrained Application Protocol (CoAP).

Por otro lado, en el modelo de paso de mensajería, los clientes siguen el intercambio de mensajes mediante el bróker, el cual tiene la función de mediador entre clientes, los cuales pueden ser productores o consumidores de datos. Los protocolos de este tipo utilizados comúnmente para IoT son comúnmente, MQTT y Advanced Message Queue Protocol (AMQP).

Se presenta un cuadro comparativo con las distintas características de las plataformas IoT disponibles, cuya elección dependerá de las características del proyecto de IoT a desarrollar:

Tabla IV. Comparación de las plataformas web para IoT

Platform	Protocol	Cost Metric	Security	Interaction Model	Openness	Libraries (Devices)	Devices Supported	Libraries (Apps)
Xively	HTTP, MQTT	Not specified	API keys, Oauth for 3rd party	Push data from devices, pull data using applications	Proprietary	C, Python	Arduino	JavaScript, ObjectiveC, PHP, Ruby, Python, Application development for Android
IBM IoT Foundation	HTTP, MQTT	Amount of data exchanged and processed	API keys, certificates	Devices push data to cloud, applications pull data from devices and cloud	Proprietary	Python, Java, Node.js, C#	Any device running the SDK	Node.js, Python, C#
Sense IoT	HTTP	Per 1000 API Calls	Username-Password hash with session ID, Oauth for 3rd party	Push data from devices, pull data using applications	Proprietary	C, Python	Arduino, Electric Imp, RPi	PHP, Python, Application development for Android and iOS, Javascript
ThingSpeak	HTTP	Free on offered endpoint	API keys	Push data from devices	Open-source	MATLAB, Python	Arduino, Electric Imp, RPi	MATLAB, Ruby 2
Ubidots	HTTP	Number of variables visualized	Tokens/API keys	Push data from devices	Proprietary	C, Python, Java	Arduino, RPi, Spark Core, Electric Imp	Python, Java, C, PHP, NodeJS, Ruby, LabVIEW
Sparkfun (phant.io)	HTTP	Free on offered endpoint	API keys	Push data from devices	Open-source	C, Python, Node.js, Python, C#, Ruby, Java	RPi, BBB, Electric Imp, WiFly	Not Specified

Platform	Protocol	Cost Metric	Security	Interaction Model	Openness	Libraries (Devices)	Devices Supported	Libraries (Apps)
AWS IoT	HTTP, MQTT, Websockets	Per 1 million queries, module based pricing	Certificates, user groups and policies for authorization	Push data from devices, pull data using applications	Proprietary	SDK in C and NodeJS	Arduino	C, NodeJS
mBed	CoAP	Free on offered endpoint	TLS libraries for web authentication	Push data from devices, pull data from device	Open-source	C++	Any device running the mBed OS	Not Specified
SicsthSense	HTTP, MQTT	Free on offered endpoint	API keys	Push data from devices, pull data using applications	Open-source	JSON	Any device running the SDK	Python, Application development for Android
Azure IoT Hub	HTTP, MQTT, AMQP	Number of applications, disk space used	Tokens, connection strings	Push data from devices, pull messages from the device	Proprietary	.NET, C, NodeJS, Java	Any device running the SDK	NodeJS, Java
Parse	HTTP	Free on offered endpoint (till 2017)	API Key and application ID	Push data from devices, push notifications for applications	Open-source	C, EmbeddedC	Arduino	Javascript, PHP, .Net
ThingPlus	HTTP	End devices and triggers	Oauth, tokens	Push data from devices, pull data using applications	Proprietary	C (Arduino)	Arduino, Beaglebone, Raspberry Pi, Edison	Not Specified

Fuente: Dolui, K., & Politecnico Di Milano, (2017). *Comparison of cloud platforms based on our taxonomy*. Recuperado de https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/131959/3/2016_12_

7.2.4.1. MQTT

Debido a la necesidad de utilizar en implementaciones de IoT un protocolo de comunicaciones que sea ligero, se opta por uno que permita comunicación bidireccional de forma confiable y que utilice poco ancho de banda.

Yuan e IBM Corporation (2018) describen que “MQTT es un protocolo de red liviano y flexible que ofrece mayor equilibrio para los desarrolladores de IoT, en comparación con otros protocolos de red populares como HTTP” (p.5).

Entre las principales desventajas y limitaciones que tienen otros protocolos basados en servicios web frente a MQTT como HTTP es que HTTP es, por ejemplo, un protocolo síncrono, unidireccional, con transmisión uno a uno, por lo que es necesaria una petición para recibir información desde un cliente; además es pesado, con muchas reglas y encabezados.

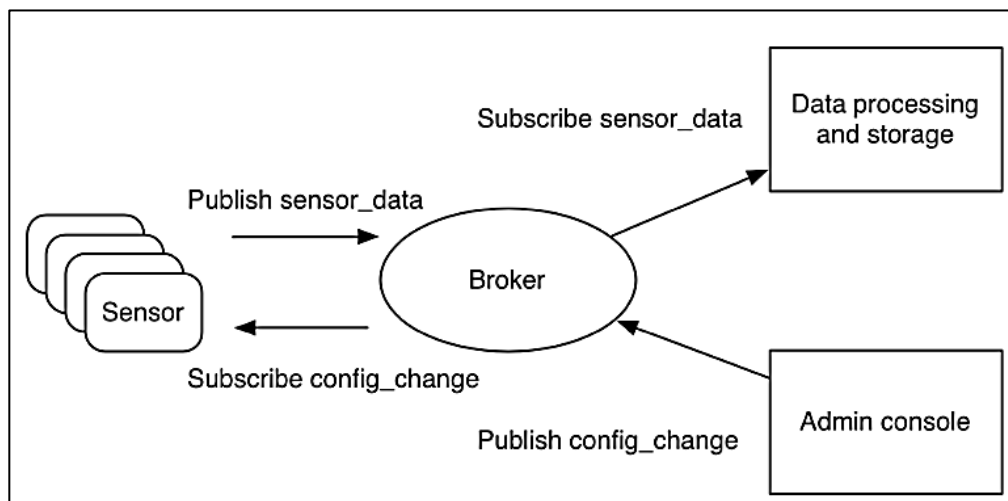
En 2016, Egli resalta las principales características del protocolo MQTT:

- Protocolo de colas y transporte de mensajes ligero.
- Modelo de comunicación asíncrona con mensajes (eventos).
- Baja sobrecarga (encabezado de 2 bytes) para aplicaciones de bajo ancho de banda de red.
- Modelo de publicación / suscripción (PubSub).
- Por tratarse de un protocolo de sistema de mensajes, separa el productor de datos (editor) y del consumidor de datos (suscriptor) a través de temas (colas de mensajes).
- Protocolo simple, dirigido a implementaciones de baja complejidad, bajo consumo de energía y espacio reducido (por ejemplo, WSN - Redes de sensores inalámbricos).

- Se ejecuta en TCP, para ser utilizado en conjunto con 6LoWPAN (Compresión de cabecera TCP).
- MQTT satisface las interrupciones de la red (inalámbrica). (p.14)

El protocolo MQTT define dos tipos de entidades en la red: un bróker de mensajería y numerosos clientes. Bróker es un servidor que recibe todos los mensajes de los clientes y redirige estos mensajes a los clientes de destino. Un cliente es cualquier cosa que pueda interactuar con el bróker y recibir mensajes. Un cliente puede ser un sensor de IoT en campo o una aplicación en un centro de datos que procesa datos de IoT. (Yuan, 2017, p.2)

Figura 17. **Modelo publicación - suscripción utilizado por MQTT**



Fuente: Yuan, M., y IBM Corporation, (2018). *El modelo de publicación y de suscripción de MQTT para sensores de IoT*. Recuperado de <https://www.ibm.com/developerWorks/ssa/>

Tigli y University of Nice Sophia Antipolis (2016) explican que los mensajes en MQTT se publican en topics o temas. No hay necesidad de configurar un tema

sino solo publicarlo. Los temas se tratan como una jerarquía, utilizando una barra (/) como separador, lo cual permite crear arreglos razonables de temas comunes, de la misma manera que un sistema de archivos.

Por ejemplo, varias computadoras pueden publicar su información de temperatura del disco duro sobre el tema siguiente, con su propia computadora y el nombre del disco duro reemplazados según corresponda:

sensores / COMPUTER_NAME / temperatura / HARDDRIVE_NAME

Para comenzar con el desarrollo de proyectos utilizando MQTT existen diferentes herramientas disponibles en el medio. El módulo Python mosquitto es la opción más fácil de usar según Yuan e IBM Corporation (2018), ya que “forma parte del proyecto Eclipse Paho y proporciona SDKs y bibliotecas de MQTT en varios lenguajes de programación” (p.4).

Esta herramienta contiene un bróker de MQTT que, Yuan e IBM Corporation (2018) apuntan “puede ser ejecutado en una computadora local y herramientas de línea de comandos que pueden interactuar con el bróker usando mensajes. Es posible descargar e instalar el módulo Mosquitto en el sitio web de Mosquitto” (p.45).

7.2.4.2. Mosquitto

Mosquitto incluye el protocolo MQTT y tiene la función de mediador de mensajes. Es de código abierto (con licencia BSD), lo que supone una ventaja para los desarrolladores ya que su uso no está restringido, tal como lo sostiene Valle Hernández (s.f.).

Mosquitto implementa el protocolo de transporte de telemetría MQ (MQTT) versión 3.1. Esto lo hace adecuado para mensajes de máquina a máquina, como con sensores de baja potencia o dispositivos móviles como teléfonos, computadoras integradas o microcontroladores como el Arduino. Tigli & University of Nice Sophia Antipolis (2016).

Se recomienda instalar el broker en un servidor que esté encendido siempre para que el protocolo MQTT esté en constante disponibilidad. Se tienen diferentes opciones, pero para los fines de esta investigación se desarrolla en una Raspberry Pi por su bajo coste y consumo.

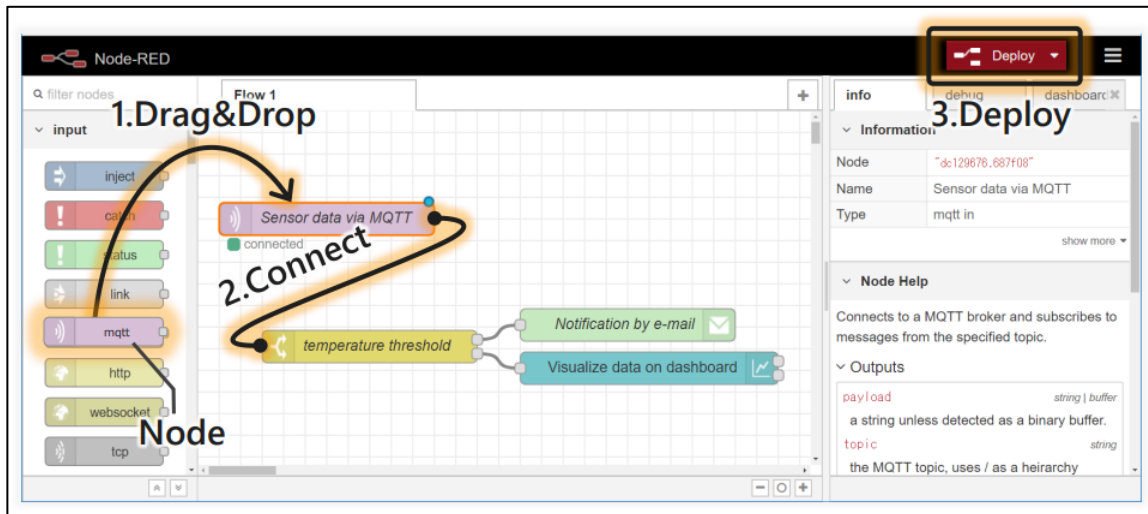
7.2.4.3. Node-RED

Node-RED es un editor visual de código abierto desarrollada originalmente por el equipo de Servicios de Tecnología Emergentes de IBM y ahora parte de la Fundación JS. Node-RED simplifica la labor de programación de conectar el internet de las cosas, APIs y servicios en línea debido a su estructura visual que permite crear relaciones y funciones, así como añadir o eliminar nodos para lograr comunicación entre ellos.

Como lo remarca Mobberley y Adafruit Industries (s.f.), “cada nodo ofrece una funcionalidad diferente que puede ir desde un simple nodo de depuración para poder ver lo que está sucediendo en su flujo, hasta un nodo de Raspberry Pi que le permite leer y escribir en los pines GPIO” (p.8).

Takaya, Kazuki y Hitachi Co., Ltd. (2018) subrayan que Node-RED cuenta con más de 1,400 nodos disponibles, incluida la tecnología esencial para aplicaciones de IoT:

Figura 18. Pasos para aplicación en Node-RED



Fuente: Takaya, I., Kazuki, N., & Hitachi Co., Ltd., (2018). *Introduction of the IoT Platform Node-RED and Hitachi's Activities*. Recuperado de https://events.linuxfoundation.org/wp-content/uploads/2017/11/Introduction-of-the-IoT-Platform-Node-RED-and-Hitachi_s-Activities-OSS-Takaya-Ide-_Kazuki-Nakanishi.pdf

Como se visualiza en la página nodered.org, Node-RED consiste en rutinas basadas en Node.js que se puede acceder mediante un navegador web. Dentro del navegador se crea la aplicación al arrastrar los nodos de la paleta a un área de trabajo y comenzar a conectarlos. Con un solo clic, la aplicación se implementa donde la rutina está corriendo.

La paleta de nodos se puede ampliar fácilmente instalando nuevos nodos creados por la comunidad; se encuentran, por ejemplo, en la página <http://flows.nodered.org/>. Los flujos que se creen se pueden compartir fácilmente como archivos JSON.

7.2.4.4. Tecnologías móviles

Las tecnologías móviles se dividen comúnmente en generaciones, donde la primera generación (1G) comienza con los sistemas análogos móviles a partir del año 1980. La siguiente generación, 2G, fue el primer sistema digital móvil y la tercera generación, 3G, fue el primer sistema manejando datos en banda ancha. La siguiente generación, 4G o Long-Term Evolution (LTE), provee un mejor soporte para la banda ancha móvil, según lo expresan Erick Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold 4G:LTE/LTE-Advanced for Mobile (Broadband, 2011).

Figura 19. **Generaciones de los sistemas de comunicaciones móviles**



Fuente: Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J., (2011). *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Oxford, UK: Elsevier/Academic Press.

El estándar GSM fue basado en el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), así como el estándar US-TDMA y el estándar japonés PDC que fue introducido en el mismo tiempo. Como estipula Erick Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold 4G:LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, (s.f), “un poco después del desarrollo del estándar de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA) llamado IS-95 fue completado en Estados Unidos en 1993” (p.81).

Todos estos estándares son de banda angosta en el sentido que apuntaban a servicios de un ancho de banda bajo como voz. Con la segunda generación de

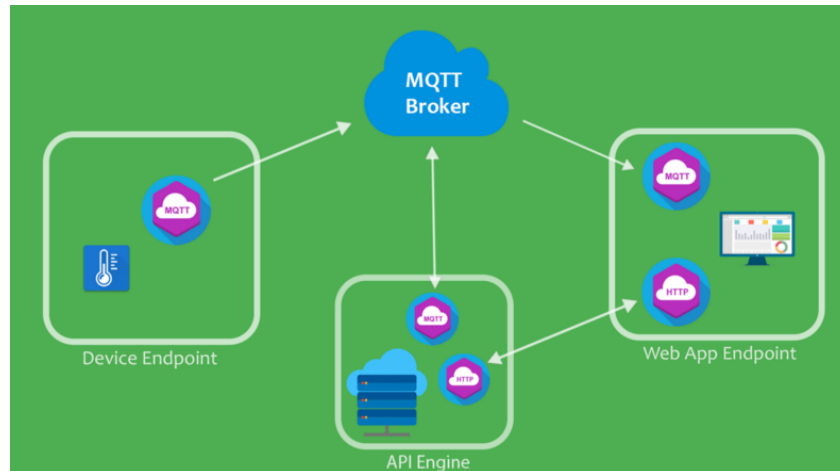
comunicaciones digitales móviles comenzó la oportunidad de proveer servicios de datos, como indican Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J., 4G:LTE/LTE-Advanced for Mobile (Broadband, 2011).

Adicional a que el bróker publique los datos de pH generados por el sensor mediante MQTT hacia el cliente web, se busca que estos datos sean almacenados en una base de datos en tiempo real para su procesamiento y análisis. Existen muchas formas de realizarlo, así como muchas plataformas en la nube que permiten el almacenamiento de forma gratuita de estas bases de datos.

El esquema que se adecua a este requerimiento es mediante el bróker MQTT, el cual reenviará el mensaje a todos los suscriptores conectados, como la aplicación web. A la vez, existe otro suscriptor conectado que representa un motor de API que aceptará estos datos y los enviará al servicio web de la base de datos para ser almacenados, tal como lo indica (Gharsellaoui, 2019).

El esquema de publicación en la nube mediante un Bróker MQTT es el siguiente:

Figura 20. Esquema de publicación en la nube



Fuente: Gharsellaoui, B., (2019). *Internet of Things prototyping with Firebase: how to do more with less*. Recuperado de <https://www.freecodecamp.org/news/iot-prototyping-with-firebase-doing-more-with-less-2f5c746dac8b/>

7.2.4.5. Base de datos en tiempo real (RTDBS)

Una base de datos puede ser de diferentes tipos. Las más comunes, como plantea Nicolas y Lucie (2018) son son "SQL, NoSQL y bases de datos en la nube. A diferencia de una base de datos común que generalmente está organizada en tablas, este tipo de bases de datos sin tablas predefinidas son llamadas schema-free" (p.7).

El procesamiento o computación en tiempo real es un sistema que está sujeto a restricciones en tiempo real, lo cual conlleva que este tipo de sistemas, según James Martin en el *Programming real-time computer systems*, (1965), sean capaces de "controlar un entorno recibiendo datos, procesándolos y devolviendo los resultados lo suficientemente rápido como para afectar el entorno en ese momento" (p.55).

Una comparación importante es que una base de datos en tiempo real difiere de una base de datos tradicional principalmente por sus objetivos de rendimiento, limitaciones de tiempo en microsegundos o incluso en nanosegundos y por su capacidad para evaluar el promedio de las transacciones perdidas y el costo incurrido por la pérdida de estas transacciones. (Nicolas y Lucie, 2017, p.1)

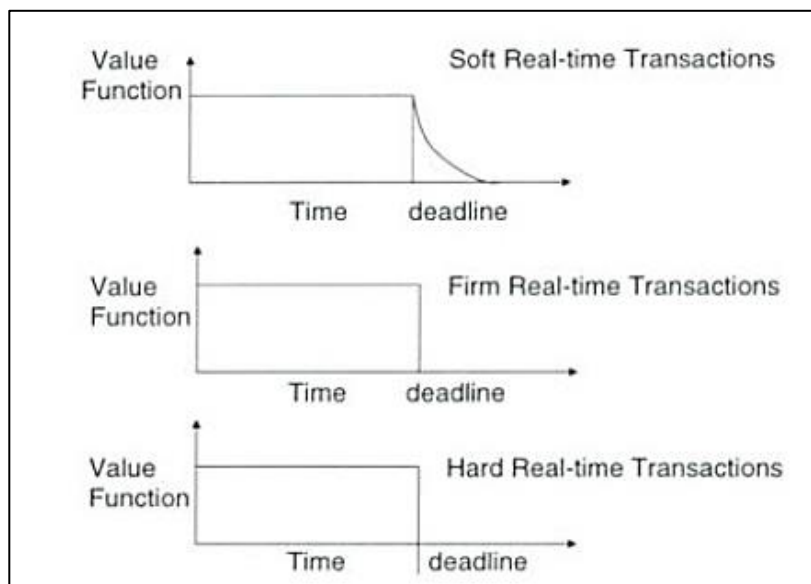
Al igual que las bases de datos convencionales, las bases de datos en tiempo real tienen se rigen por las características ACID:

- Atomicity - Atomicidad: las transacciones son completas, una transacción nunca debe quedar incompleta.
- Consistency - Consistencia: las transacciones se ejecutan en un orden específico determinado, se realiza solo lo que se puede concluir.
- Isolation - Aislamiento: las transacciones no pueden ver ni afectar las acciones de otra transacción mientras aún no esté asignada.
- Durability - Durabilidad: una vez comprometida, una transacción no puede ser modificada o eliminada, aunque falle el sistema.

Las bases de datos en tiempo real son adecuadas cuando se intenta tener una buena imagen del estado de un entorno determinado. Las RTDBS tienen restricciones de tiempo, las cuales no son compatibles con las bases de datos convencionales y utilizan fechas límites para determinar la precisión del valor medido. Estas restricciones de tiempo pueden ser las siguientes:

- **Hard:** la transacción debe completarse antes de la fecha límite. Esto significa que el mejor esfuerzo no es suficiente. La transacción tiene que ser periódica. Los requerimientos de recursos y el peor tiempo de ejecución de caso deben ser conocidos.
- **Firm:** si la transacción no se completa antes de la fecha límite, entonces es abortado.
- **Soft:** la importancia de la información disminuye si se completa después de la fecha límite. Pero la transacción continúa de todos modos hasta que se complete.

Figura 21. **Tiempo de vida de las transacciones representado como funciones de valor**



Fuente: Nicolas, B., & Lucie, B., (2018). *Deadlines represented with value functions*.

Recuperado de https://ftp.utcluj.ro/pub/users/civan/IBD/3_EVALUARE/1_Referat/Resurse/B_2017_firebase.pdf

Adicional a las restricciones de tiempo, una transacción está especificada por las siguientes características:

- Implicación de la falta de fecha límite: difícil, crítica o suave.
- Patrón de llegada: periódico o no.
- Patrón de acceso a datos: solo lectura, solo escritura, actualización o aleatorio.
- Tiempo de ejecución: puede ser conocido o desconocido.

Nicolas y Lucie (2018) determinan que “las bases de datos tradicionales tienen poca capacidad de respuesta y una falta de previsibilidad, que son las características principales de un RTDBS. Los datos nunca se vuelven obsoletos en una base de datos tradicional, lo que no es el caso en un sistema de base de datos en tiempo real (datos estáticos vs. datos en tiempo real)” (p.36).

Según Nicolas y Lucie (2018) una base de datos en tiempo real se compone de dos elementos principales:

- Sistema de control: punto entre la computadora y su software.
- Sistema controlado: sistema que percibe el estado del entorno observado y guardado en la base de datos. Se debe mantener un alto grado de precisión entre el estado real del entorno y el estado del entorno en la base de datos.

Para la administración de una base de datos en tiempo real, existen en el medio, distintos programas como CouchDB, MariaDB, RethinkDB y Firebase.

7.2.4.5.1. **Firestore**

Firestore es una plataforma de back-end desarrollada por Google para crear aplicaciones web y móviles nativas multiplataforma, con SDK Android, iOS y JavaScript. Ofrece bases de datos en tiempo real, diferentes API, múltiples tipos de autenticación de usuarios y una plataforma de alojamiento de datos estático, con la posibilidad de conectar Firestore a un backend existente utilizando bibliotecas del lado del servidor o con la API REST, como indica Tutorials (Point, 2017).

Tutorials Point (2017) propone también que para su implementación, de preferencia se requiere algunos conocimientos de JavaScript, pero no es necesario conocer alguna plataforma backend con anterioridad.

Este RTDBS es un sistema comercial de alojamiento de datos en la nube, schema-free y utiliza el mecanismo de almacenamiento NoSQL que significa "Not only SQL", lo cual lo hace escalable y con mayor rendimiento que las BD tradicionales. Entre las características que Tutorials Point destaca de Firestore se encuentran los siguientes:

- Base de datos en tiempo real: firestore admite datos JSON y todos los usuarios conectados reciben actualizaciones en vivo después de cada cambio.
- Autenticación: se pueden usar anónimos, contraseñas o diferentes autenticaciones sociales.

- Alojamiento: las aplicaciones se pueden implementar a través de una conexión segura a los servidores firebase.

Ventajas de firebase:

- Es simple y fácil de usar y no necesita configuración complicada.
- Los datos son en tiempo real, por lo tanto cada cambio se actualizará automáticamente a los clientes conectados.
- Panel de control simple.
- Varios servicios útiles a elección.

Aunque firebase es un sistema de base de datos comercial, hay disponible una licencia gratuita. Entre las limitaciones que tiene Firebase es que el uso del plan gratuito está limitado a 50 conexiones y 100 MB de almacenamiento.

7.2.5. Sensores de potencial de hidrógeno (pH)

La medida de pH es esencial en muchas industrias y su monitoreo se relaciona con la calidad de los productos y sus reacciones químicas. En el mercado existen diversas tecnologías, fabricantes y precios, los cuales difieren según la calidad de los materiales y la aplicación en la que se utilizará el sensor.

En general un equipo de medición de pH completo consta del elemento sensor (electrodo de pH), un conector, un cable y un transmisor.

7.2.5.1. Tipos de sensores

La elección de un determinado sensor depende de la aplicación y las condiciones a las que será expuesto. Las aplicaciones pueden ir desde aguas residuales y mezclas químicas hasta agua ultra pura en centrales eléctricas o laboratorios.

La vida útil de un electrodo de pH depende de estas condiciones, pero también de la limpieza, la calibración, los intervalos de regeneración y la elección correcta del tipo de sensor, tal como expresa (Endress+Hauser, 2015).




7.2.5.1.1. Sensor de vidrio

En una publicación de Endress+Hauser (2015) se señala que el elemento sensor de pH del electrodo de vidrio estándar es una capa de gel en el bulbo de vidrio con un grosor submicrométrico. Esta capa es capaz de incorporar H⁺ y esto resulta en un cambio del potencial electrostático a través del bulbo de vidrio. Este cambio potencial se mide en relación con un elemento de referencia que está en contacto con el medio por el diafragma para crear un circuito eléctrico cerrado.

También se plantea que “hay disponibles diferentes tipos de sensores de vidrio, como versiones higiénicas y no higiénicas. Estos difieren en el tipo de diafragma utilizado (cerámica, Teflon® o ninguno) y en el tipo de gel o líquido utilizado para el sistema de referencia” (p.43).

A continuación, se presentan los sensores Endress+Hauser de vidrio con diferentes tipos de diafragma:

Tabla V. **Sensores de vidrio con diferentes tipos de diafragma**

	Glass sensor Orbisint CPS11/CPS11D	Glass sensor Ceragel CPS71/CPS71D	Glass sensor Orbipore CPS91/CPS91D
			
pH range	0 to 14	0 to 14	0 to 14
Temperature range	32 to 275°F / 0 to 135°C	32 to 275°F / 0 to 135°C	32 to 230°F / 0 to 110°C
Max. pressure	Up to 232 psi / 16 bar (with B-glass)	Up to 188.5 psi / 13 bar	Up to 188.5 psi / 13 bar
Min. conductivity	50 µS/cm	10 µS/cm	500 µS/cm
Organic content	< 20 vol%	< 20 vol%	< 20 vol%
Shaft material	Glass	Glass	Glass
Diaphragm	PTFE	Ceramic	Open junction




Fuente: Endress+Hauser, (2015). *pH measurement in industrial processes (Selection and engineering guide for your industry and application)*. Recuperado de https://portal.endress.com/wa001/dla/5000455/3062/000/01/CP00010C24EN1315_US%20ph%20sel%20guide.pdf

Endress+Hauser (2015) describen que el elemento sensor de un sensor ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor) es un chip semiconductor que forma un transistor de efecto de campo sensible a iones. El chip ISFET es especialmente sensible a los iones H⁺. Los sensores que no son de vidrio son irrompibles y los sensores ISFET pueden tolerar cantidades más altas de solventes orgánicos que los sensores de vidrio. Los sensores tipo vidrio e ISFET utilizan los mismos tipos de referencia y diafragma.

Entre las principales características están cuando en el área de aplicación el vidrio no está permitido o no es necesario; es decir, en procesos alimentarios o cuando hay altas cantidades (> 20 %) de disolventes orgánicos. Los sensores ISFET están hechos de PEEK™ y tienen un menor error alcalino y ácido en comparación con los sensores tipo vidrio. Una restricción del chip ISFET es que no puede soportar cáusticos calientes (CIP).

A continuación, se presentan los sensores Endress+Hauser ISFET con diferentes tipos de diafragma:

Tabla VI. **Sensores ISFET con diferentes tipos de diafragma**

	ISFET sensor Tophit CPS471/CPS471D	ISFET sensor Tophit CPS491/CPS491D	ISFET sensor Tophit CPS441/CPS441D
			
Max. pressure	Up to 145 psi / 10 bar _{rel}	Up to 145 psi / 10 bar _{rel}	Up to 145 psi / 10 bar _{rel}
pH range	0 to 14	0 to 14	0 to 14
Temperature range	5 to 275°F / -15 to 135°C	5 to 230°F / -15 to 110°C	5 to 266°F / -15 to 130°C
Min. conductivity	10 µS/cm	500 µS/cm	0.1 µS/cm
Organic content	High level possible depending on application	High level possible depending on application	High level possible depending on application
Shaft material	PEEK, chip sealing: EPDM	PEEK, chip sealing: perfluorelastomer	PEEK, chip sealing: EPDM or perfluorelastomer
Diaphragm	Ceramic	Open junction	Ceramic

Fuente: Endress+Hauser, (2015). *pH measurement in industrial processes (Selection and engineering guide for your industry and application)*. Recuperado de https://portal.endress.com/wa001/dla/5000455/3062/000/01/CP00010C24EN1315_US%20ph%20sel%20guide.pdf

7.2.5.1.2. Sensor combinado

Sensorex (2018) asegura en su página web que la forma más común de medir parámetros de pH es utilizando un sensor electromecánico combinado, el cual cuenta con un electrodo de medición y un electrodo de referencia. La función del electrodo de medición es detectar cambios en el valor de pH, mientras que el electrodo de referencia proporciona una señal estable que sirve para la comparación. Este electrodo de referencia lo constituye un cable de Plata / cloruro de plata (Ag / AgCl) que se encuentra en una solución de cloruro de potasio (KCl).

Cuando se usa un sensor combinado de pH, la señal de milivoltios del vidrio de pH y la señal de milivoltios del electrodo de referencia se comparan para calcular el verdadero valor de pH de una solución. Estas señales son compatibles con un dispositivo de alta impedancia, conocido como medidor de pH, cuya función es mostrar la señal de milivoltios en unidades de pH.

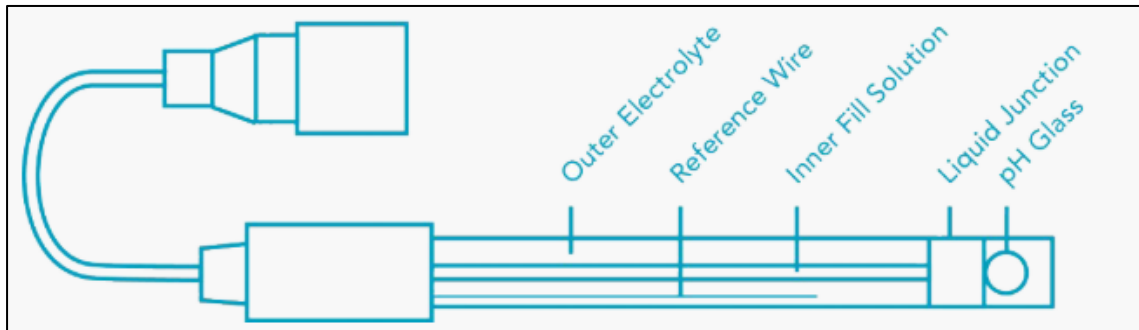
La tecnología de sensores de pH combinados se puede utilizar para construir diferentes productos, como sensores de pH de laboratorio y sensores de pH industriales o de proceso.

Los sensores de pH combinados fabricados de vidrio y plástico de 12 mm se conocen comúnmente como sensores de estilo de laboratorio. Estos sensores funcionan bien en aplicaciones de trabajo liviano, como educación e investigación, muestreo ambiental y monitoreo de piscinas. Por otro lado, los sensores de pH de proceso son adecuados para el monitoreo continuo del pH. Los sensores de pH de proceso generalmente se montan en una tubería, se sumergen en un tanque o se usan como parte de un conjunto de inserción. Los materiales para su construcción son más resistentes y

puede incluir elementos de conexión hidráulicas estandarizadas (NTP).
(Sensorex, s.f., p.2)

A continuación, se presenta el esquema general de las partes de un sensor de pH pasivo:

Figura 22. **Partes de una sonda de pH (Sensorex)**



Fuente: Sensorex, (s.f.). *Innovative solutions to simplify liquid analysis*. Recuperado de <https://sensorex.com/es/>




Los sistemas hidropónicos típicamente incorporan sensores de pH y EC de estilo laboratorio, ya que tienen la ventaja de ser económicos y fáciles de usar. Los sensores con cuerpo de plástico son los preferidos para aplicaciones hidropónicas ya que son duraderos, así como los sensores de pH de unión única, los cuales dan buenos resultados. Por otro lado, Endress+Hauser (2015) afirma que:

El elemento de platino en sus sensores, permite la medición simultánea del valor de pH y el potencial de ORP (Potencial de oxidación-reducción) para una visión general del proceso, adicional a que puede usarse para medir la

impedancia de referencia para anticipar disminuciones en la calidad del sensor. (p.10)

A continuación, se presentan los sensores Endress+Hauser combinados con diferentes tipos de diafragma:

Tabla VII. **Sensores combinados con diferentes tipos de diafragma**

Combined pH/ORP sensor Memosens CPS16D	Combined pH/ORP sensor Memosens CPS76D	Combined pH/ORP sensor Memosens CPS96D
		
Up to 232 psi / 16 bar _{rel} (with B glass)	Up to 188.5 psi / 13 bar _{rel}	Up to 188.5 psi / 13 bar _{rel}
pH: 0 to 14 ORP: -1500 to 1500 mV rH: 0 to 42	pH: 0 to 14 ORP: -1500 to 1500 mV rH: 0 to 42	pH: 0 to 14 ORP: -1500 to 1500 mV rH: 0 to 42
32 to 275°F / 0 to 135°C	32 to 284°F / 0 to 140°C	32 to 230°F / 0 to 110°C
50 μS/cm	10 μS/cm	500 μS/cm
< 20 vol%	< 20 vol%	< 20 vol%
Glass	Glass	Glass
PTFE	Ceramic	Open junction

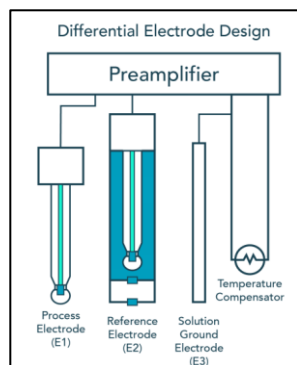
Fuente: Endress+Hauser, (2015). *pH measurement in industrial processes (Selection and engineering guide for your industry and application)*. Recuperado de https://portal.endress.com/wa001/dla/5000455/3062/000/01/CP00010C24EN1315_US%20ph%20sel%20guide.pdf

7.2.5.1.3. Sensor de pH diferencial

En comparación con una sonda de pH de combinación típica, Sensorex (2018) distingue que los sensores de pH diferencial funcionan de manera distinta, ya que, “mientras los sensores de pH combinados tienen 2 electrodos, los sensores de pH diferencial cuentan con 3 electrodos. En el diseño diferencial, 2 electrodos miden el pH diferencialmente con respecto a un tercer electrodo de tierra metálico. Este diseño tiene la ventaja de evitar las interferencias, lo que lo hace ideal para aplicaciones industriales como depuradores húmedos” (p.67).

La referencia de un sensor de pH diferencial es un electrodo de pH de medición en una solución buffer o amortiguadora de pH 7.0 conocida. La celda de referencia (E2) hace contacto eléctrico con el proceso mediante un puente salino de doble unión. El otro electrodo de pH de medición (E1) está en contacto directo con el proceso. Los electrodos de proceso y de referencia miden el pH de manera diferente con respecto a un tercer electrodo de tierra metálico (E3).

Figura 23. Esquema de un sensor de pH diferencial. (Sensorex)



Fuente: Sensorex. (s.f.). pH *Sensors for water and wastewater monitoring*. Recuperado de <https://sensorex.com/ph-sensors-3/>

En comparación con los sensores de combinación convencionales, los sensores de pH diferencial proporcionan mediciones con mayor estabilidad durante períodos largos con menos tiempo de inactividad y mantenimiento.

7.2.5.1.4. Sensores de pH inteligentes

Normalmente, un medidor de pH / mV se integra junto a un transmisor o un controlador para adecuar las señales del sensor antes de registrar datos o programar el control del proceso. El mismo principio se aplica a otros sensores y parámetros de calidad del agua como señales de sensores de conductividad / TDS, oxígeno disuelto, cloro y potencial de reducción de oxidación, donde se utiliza instrumentación para convertir estas señales en datos útiles.

Un sensor inteligente, por lo tanto, incorpora algunas de las capacidades de procesamiento de señales y manipulación de datos de un transmisor o controlador, directamente en el sensor. Los módulos electrónicos de sensores inteligentes funcionan esencialmente como un microtransmisor, el cual elimina la necesidad del uso de instrumentación adicional. Por ejemplo, un sensor de pH inteligente con un protocolo analógico (4-20 mA) o digital (MODBUS) se puede conectar directamente a un sistema PLC o SCADA.

Entre las ventajas de utilizar sensores inteligentes se encuentra que pueden precalibrarse en cualquier sitio, eliminando la necesidad de calibrar en el campo. En lugar de llevar las soluciones de calibración y otros equipos al sitio, se puede mantener en inventario los sensores precalibrados para estar listo con reemplazos rápidos cada vez que los clientes los necesiten. Adicionalmente, este tipo de sensores tienen una vida útil mayor y algunos con ningún mantenimiento requerido.

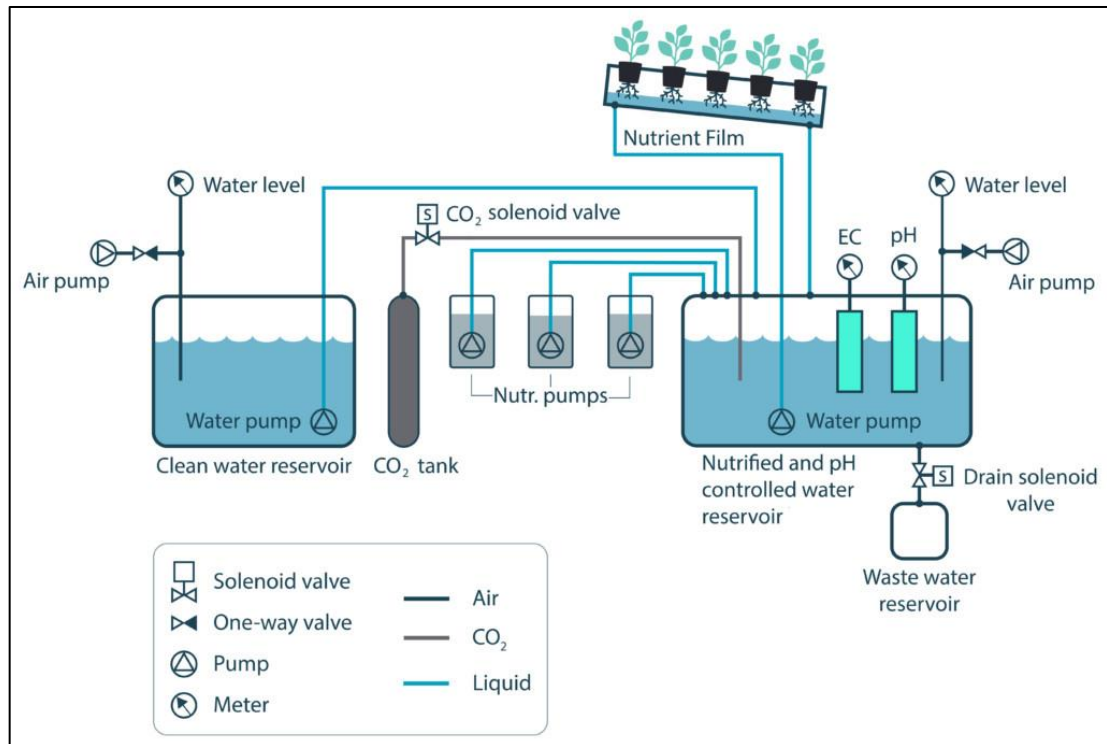
7.2.5.2. Monitoreo de pH dentro de un sistema de cultivo hidropónico

Un sistema de cultivo hidropónico generalmente contiene tres tanques de agua: agua limpia y fresca, agua enriquecida con nutrientes y pH controlado, y aguas residuales. El agua enriquecida con nutrientes y el pH controlado comprende el medio de crecimiento para las plantas. El nivel de pH y la composición de nutrientes en este depósito de agua se controlan mediante válvulas y bombas para agregar nutrientes, dióxido de carbono o agua dulce. El drenaje de las aguas residuales del depósito de agua enriquecido con nutrientes ayuda a mantener niveles constantes de agua, al mismo tiempo que ajusta la concentración de nutrientes y el pH. (Sensorex, 2018, p.1)

Para configurar un sistema de monitoreo hidropónico se debe instalar sensores de conductividad y sensores de pH en el depósito de la solución que se utilizará para suministrar el medio de crecimiento de las plantas. Según los datos de medición de los sensores, los controladores de pH y los controladores de conductividad se realiza la apertura y cierre de las válvulas o el funcionamiento de las bombas, ya sea de forma manual o automatizada.

Un esquema general de control y monitoreo se presenta a continuación:

Figura 24. **Esquema de control y monitoreo de un sistema hidropónico. (Sensorex)**



Fuente: Sensorex. (s.f.). *pH Sensors for water and wastewater monitoring*. Recuperado de <https://sensorex.com/ph-sensors-3/>

En función de las lecturas proporcionadas por los sensores de pH y CE, se pueden establecer tres principales escenarios:

- Alta concentración de nutrientes y alta conductividad => Agregar agua dulce.
- Baja concentración de nutrientes y baja conductividad => Añadir nutrientes.
- Solución excesivamente alcalina y pH alto => Agregar dióxido de carbono.

7.3. Calidad en la producción de hortalizas

Ordoñez (2002) destaca que la calidad juega un rol importante en la adaptación de procesos, productos y servicios a los constantes cambios de paradigma tanto institucional, organizacional, tecnológico y comercial que conlleva la globalización y su búsqueda de ventajas competitivas focalizadas a las preferencias del cliente.

La calidad en las hortalizas se define como “todos aquellos atributos que determinan la preferencia de la fruta u hortaliza por parte del consumidor o cliente y que tiene relación con la aspectos físicos, características organolépticas y condición sanitaria de los productos” (Morales, 2009, p.109).

Viglizzo (2004) describe que, “debido a las exigencias del mercado internacional, la producción industrial y de servicios han sido sectores económicos pioneros en adaptar estándares, normas y protocolos que permiten unificar criterios de calidad y luego relacionarlos con el desarrollo sustentable” (p.44).

7.3.1. Administración de la calidad en producción de alimentos

Como cualquier sistema de administración de la calidad, las buenas prácticas deben de ser consensuadas entre los entes involucrados en relación a términos, parámetros y tolerancias aceptadas para que estas sean reconocidas de forma global sin importar el origen del producto, tal como lo exponen Clemens y Marbán (2007).

Clemens y Marbán (2007) definen una norma como “un documento aprobado por una entidad reconocida, que proporciona, para uso común y

repetido, reglas, guías o características para productos o procesos relacionados y métodos de producción, y cuyo cumplimiento no es obligatorio” (p.49).

Es importante diferenciar que el término norma se aplica a directrices cuyo cumplimiento es de carácter voluntario, mientras que las directrices de aplicación obligatoria se establecen en reglamentos técnicos. Las normas son constituidas por entidades y comités independientes internacionales; las normas técnicas son desarrolladas por entidades gubernamentales.

Por ejemplo, en el sector de alimentos, las recomendaciones normalizadas son elaboradas por los comités del Codex Alimentarius. El Codex Alimentarius fue establecido en 1963 por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) (1993) Es “un organismo con 165 países miembros que representan más del 98 por ciento de la población mundial” (p.1).

La finalidad del Codex Alimentarius, según la FAO (1999), es “proteger la salud de los consumidores y asegurar la aplicación de prácticas productivas y de comercialización justas, así como desarrollar normas de alimentos, guías y textos relacionados” (p.5).

En el Codex Alimentarius se reúnen más de 200 normas alimentarias, difundidas internacionalmente y adoptadas de forma voluntaria. FAO (1999) subraya que:

Son generalmente normas o recomendaciones para el etiquetado de los alimentos, el empleo de aditivos, sustancias contaminantes, métodos de análisis y pruebas, higiene alimentaria, nutrición y alimentos para dietas especiales, importación de alimentos y sistemas de inspección y

certificación en la exportación de alimentos, residuos de medicamentos veterinarios y de plaguicidas. (p.3)

Entre los textos desarrollados por el Programa Conjunto FAO/OMS sobre Normas Alimentarias (Comisión del Codex Alimentarius), se encuentra el Código internacional recomendado de prácticas principios generales de higiene de los alimentos. En CAC/RCP 1-1969, Rev. 4 (2003), se expresa que “para un control eficaz de la higiene: todos, agricultores y cultivadores, fabricantes y elaboradores, manipuladores y consumidores de alimentos, tienen la responsabilidad de asegurarse de que los alimentos sean inocuos y aptos para el consumo” (p.9).

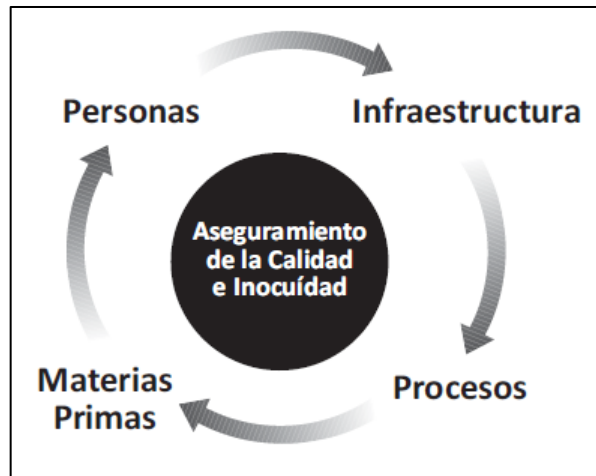
En dicho documento se presenta una serie de controles fundamentales, reconocidos internacionalmente para asegurar, “alimentos inocuos y aptos para el consumo, mediante el seguimiento de la cadena alimentaria desde la producción primaria hasta el consumo final, resaltándose los controles de higiene básicos que se efectúan en cada etapa” (p.66).

7.3.2. Gestión de aseguramiento de la calidad

Un sistema de aseguramiento de la calidad e inocuidad, como lo estipula ICA (2009), corresponde a “todas aquellas actividades coordinadas que buscan proporcionar confianza en que se cumplirán los requisitos de calidad e inocuidad de las frutas y hortalizas producidas” (p.86).

Por lo tanto, para garantizar inocuidad y evitar peligros de causa biológica que puedan producir daños tanto a la salud como a la economía, es importante relacionar los siguientes conceptos para el aseguramiento de la calidad e inocuidad de un alimento:

Figura 25. **Conceptos para el aseguramiento de la calidad e inocuidad de un alimento**



Fuente: Morales, C., (2009). *Buenas Prácticas Agrícolas. Aspectos relevantes en la producción de frambuesa (Rubus idaeus L.)*.

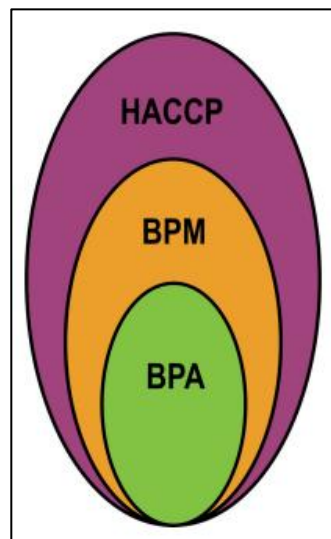
Morales (2009) también puntualiza que “un sistema para el aseguramiento de la calidad e inocuidad debe considerar una adecuada gestión tanto de los recursos humanos como los procesos de trabajo desarrollados en pro de los objetivos de calidad e inocuidad del alimento” (p.45).

Para lograr estos objetivos, se debe aplicar los sistemas de aseguramiento indicados por la Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica de Argentina (ANMAT) (2008), entidad que resalta la importancia que tienen las BPA en conjunto con las buenas prácticas de manufactura (BPM) y el análisis de peligro y puntos de control críticos (HACCP): “Las BPA y BPM son las herramientas básicas con las que contamos para la obtención de productos inocuos para el consumo humano, e incluyen tanto la higiene y manipulación como el correcto diseño y funcionamiento de los

establecimientos, y abarcan también los aspectos referidos a la documentación y registro de las mismas. Las BPM se articulan con las BPA y ambas son prerequisites del sistema de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP)” (p.3).

Esta interacción la podemos visualizar de una mejor manera en el siguiente gráfico:

Figura 26. **Interacción entre BPA, BPM y HACCP**



Fuente: ANMAT, (s.f.). *Buenas prácticas aplicadas a los alimentos*. Recuperado de http://www.anmat.gov.ar/portafolio_educativo/pdf/cap4.pdf

En la cartilla ICA (2009) se detalla que “la aplicación de las BPA, BPM y HACCP son parte de un sistema de aseguramiento de la calidad en las distintas etapas de producción de frutas y hortalizas” (p.26).

Figura 27. **BPA como parte de un sistema de aseguramiento de la calidad**



Fuente: Oficina de Gestión Integral y Mejoramiento Continuo, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, República de Colombia, (2009). *Sistemas de aseguramiento. CORPOICA Buenas Prácticas Agrícolas.*

Las BPA son prácticas y medidas adoptadas para asegurar que los alimentos sean producidos en condiciones higiénicas apropiadas aplicando procedimientos en la producción primaria que comprende la selección y adecuación de las áreas de producción, así como el control de contaminantes, plagas y enfermedades de las plantas. (ANMAT, s.f., p.12)

Jaramillo, Rodríguez, Guzmán, Zapata y Rengifo (2007) también resaltan que las BPA también pueden incorporar el manejo integrado de plagas - MIP - y el manejo integrado del cultivo (MIC), cuyo objetivo es ofrecer un producto de elevada calidad e inocuidad con un mínimo impacto ambiental, con bienestar y seguridad para el consumidor y los trabajadores y que permita proporcionar un marco de agricultura sustentable, documentado y evaluable.

7.3.2.1. Buenas prácticas agrícolas

La FAO hace referencia a las buenas prácticas agrícolas (BPA) como:

Las mejores prácticas utilizadas en la producción agrícola a fin de garantizar la calidad e inocuidad del producto final. En general, los productos son cultivos, alimentos básicos y alimentos de origen animal. De esta manera, las BPA se aplican en la granja y donde se crían animales para producir alimentos. (p.5)

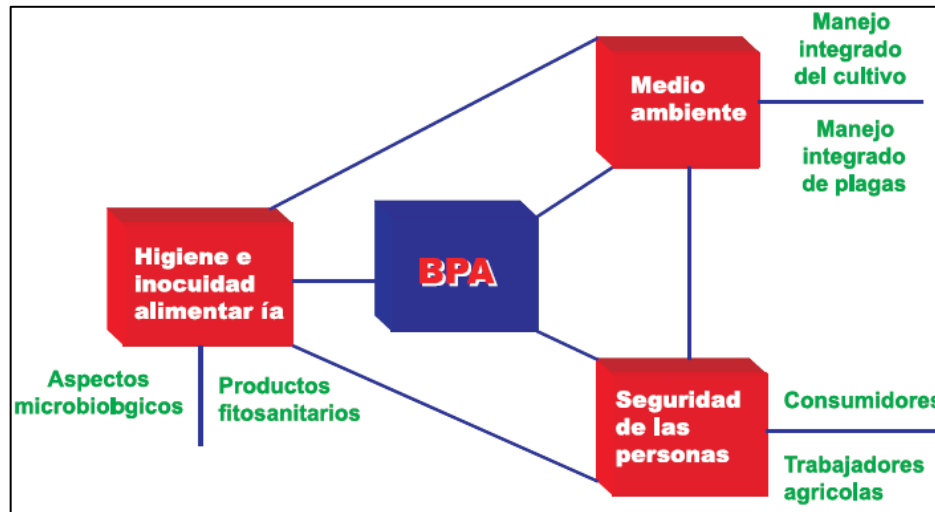
Las BPM son procedimientos que se aplican al procesamiento de alimentos y su utilidad radica en que nos permite diseñar adecuadamente la planta y las instalaciones, realizar en forma eficaz los procesos y operaciones de elaboración, almacenamiento, transporte y distribución de alimentos. (ANMAT, s.f., p.4).

Algunas certificaciones de buenas prácticas agrícolas son:

- EUREPGAP/GLOBALGAP (Euro Retailer Produce Working Group)
- TNC (Tesco)
- BRC (British Retail Consortium)
- SQF 1000 (Safe Quality Food))

Las BPA se enfocan en tres principios que remarcan Jaramillo, Rodríguez, Guzmán, Zapata y Rengifo (2007): “la obtención de productos sanos que no representen riesgos para la salud de los consumidores, la protección del medio ambiente y el bienestar de los agricultores” (p.105).

Figura 28. Principios básicos de BPA



Fuente: Corpoica Mana Gobernación De Antioquia - FAO, Jaramillo, J., Rodríguez, V., Guzmán, M., y Zapata, M., (2007). *Esquema de los principios básicos de BPA. Manual Técnico: Buenas Prácticas Agrícolas en la Producción de tomate bajo condiciones protegidas.*

Para la implementación de un programa de BPA, Jaramillo, Rodríguez, Guzmán, Zapata y Rengifo (2007) enfatizan que:

Es importante el conocimiento previo de las acciones o líneas que rigen este sistema de calidad, como son: el medio ambiente, la sanidad e inocuidad de los productos, su trazabilidad por medio de registros, y la seguridad para los trabajadores y consumidores. (p.5)

Por lo tanto, Jaramillo, Rodríguez, Guzmán, Zapata y Rengifo (2007) en una adecuada implementación de BPA “se debe procurar la viabilidad económica y social, aplicando el conocimiento disponible y haciendo uso sostenible de los recursos naturales involucrados en la producción de los productos agrícolas” (p.4).

7.3.2.2. Aplicación de BPA en la cadena de producción

Para comprender de una mejor manera en qué etapa de la producción de cultivos hidropónicos son aplicadas las buenas prácticas agrícolas, es importante definir lo que es una cadena de producción. Ortiz (2009) afirma:

Una cadena de producción es el conjunto de etapas y actores por las que atraviesa su producto, desde la producción primaria (preparación del terreno, selección de las semillas, siembra, aplicación de plaguicidas, cosecha, entre otros), pasando por el procesamiento (por ejemplo, deshidratado, salmuera, fabricación de mermeladas), embalaje, almacenamiento, transporte, hasta su venta al consumidor final. (p.7)

Por lo tanto, en una cadena de producción de cultivos hidropónicos, las BPA son aplicadas directamente en la etapa primaria y su aplicación son la puerta de entrada a un sistema integral de aseguramiento de calidad con opción a certificación.

7.3.2.3. Ventajas de implementar BPA

Las ventajas que se obtienen al implementar BPA en la producción de cultivos hidropónicos urbanos impactan de muchas formas y a varios sectores, tales como los siguientes:

- Ahorro en materias primas (semillas, fertilizantes, plaguicidas) y energía, y en consecuencia, sus costos de producción serán más bajos.
- Mejora y protege la salud de su familia y de los trabajadores/as.

- Protege la seguridad de la familia de los productores y el medioambiente.
- Mejora los productos y la manera en que se procesan.
- Mejora oportunidades y precios, lo cual aumenta la posibilidad de vender los productos a nuevos mercados, tanto dentro, como fuera del país.
- Los clientes prefieren los productos ya que cumplen todas las normas y se pueden diferenciar de los productos que no lo hacen.

Adicional a estas ventajas, Jaramillo, Rodríguez, Guzmán, Zapata y Rengifo (2007), aportan las siguientes:

- Mejora las condiciones higiénicas del producto.
- Previene y minimiza el rechazo del producto en el mercado debido a residuos tóxicos o características inadecuadas en sabor o aspecto para el consumidor.
- Minimiza las fuentes de contaminación de los productos, en la medida en que se implementen normas de higiene durante la producción y recolección de la cosecha.
- Mejora la administración y control de personal, insumos e instalaciones de la finca o empresa en términos productivos y económicos, y aumenta la competitividad de la empresa por reducción de costos debido a menores pérdidas de insumos, horas de trabajo, tiempos muertos.

- Se reduce la cadena comercial (menos intermediarios) al habilitar la entrada directa a supermercados, empresas exportadoras.
- El personal de la empresa se compromete más con ella, porque aumenta la productividad gracias a la especialización y dignificación del trabajo agropecuario.
- Mejora la imagen del producto y de la empresa ante sus compradores (oportunidades de nuevos negocios) y, por agregación, mejora la imagen del propio país.
- Desde el punto de vista de las comunidades, las BPA representan un recurso de inclusión en los mercados y constituyen una excelente oportunidad para demostrarse a sí mismas y a otras comunidades que se pueden integrar con éxito, al tiempo que mejoran su calidad de vida y su autoestima, sin dejar de lado sus valores culturales. (p.5)

En general, como señala Morales (2009) “las BPA permiten aumentar la productividad mediano y largo plazo, ya que algunos de sus componentes mejoran el conocimiento y la gestión del sistema productivo” (p.111).

7.3.2.4. Consideraciones para la implementación de la BPA

Para implementar un sistema de BPA dentro de la estructura de un proyecto nuevo o como parte de una reingeniería de los procesos de un sistema productivo existente, se deben considerar varios aspectos esenciales para garantizar la obtención de alimentos inocuos y de calidad.

Estos aspectos pueden involucrar y profundizar tantos ítems como el manual o autor desee; en su manual *Mis buenas prácticas agrícolas*, Ciro (2009) menciona que existen características en común:

- Áreas e instalaciones
- Equipos, utensilios y herramientas
- Personal
- Compromisos del productor
- Manejo de suelos
- Material de propagación
- Nutrición de las plantas
- Protección de cultivos
- Documentación y manejo de registros
- Plan de manejo de residuos
- Asistencia técnica permanente. (p.14)

Brambilla, Daorden, Babbitt (2012) resaltan principalmente los siguientes aspectos a tomar en cuenta y evaluar:

- Sitio de producción
- Material de propagación
- Gestión del suelo y sustratos
- Agua y riego
- Abonos y fertilizantes
- Gestión de productos fitosanitarios
- Manejo del producto final
- Salud, seguridad y bienestar laboral
- Gestión de desechos y protección del ambiente

- Trazabilidad y registros. (p.5)

Mientras, en la guía de buenas prácticas agrícolas para la producción de frutas y hortalizas frescas en Uruguay (2014), se indican los siguientes:

- Sistema productivo
- Cosecha
- Poscosecha
- Gestión del agua del predio
- Gestión de plaguicidas
- Maquinaria, recipientes, utensilios y herramientas
- Manejo de los animales
- Gestión de desechos
- Personal
- Documentación de las operaciones
- Trazabilidad
- Mantenimiento de registros y rastreo
- Planificación de la producción
- Buenas prácticas de cultivo
- Recolección y manipulación de producto
- Protección del medio ambiente
- Comercio de productos limpios. (p.6)

En el manual de buenas prácticas agrícolas elaborado por el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria de Argentina (SENASA) (2010), se distinguen los siguientes aspectos a considerar para la implementación de un sistema de buenas prácticas agrícolas:

- Elección del sitio de producción
- Uso del agua
- Manejo del suelo
- Selección del material de propagación
- Seguridad y protección de los trabajadores
- Manejo sanitario del cultivo
- Instalaciones y equipamiento del establecimiento
- Manejo de productos de cosecha y poscosecha
- Sistema de trazabilidad de productos
- Residuos
- Registros
- Capacitación permanente. (p.14)

Los impactos por categoría, según Benke y Bruce (2017), son:

- Económicos
 - Mejora de la productividad.
 - Costo base reducido para fertilizantes, herbicidas y pesticidas.
 - Sin pérdidas por inundaciones, sequías o daños por el sol.
 - Costes de transporte reducidos.
 - No hay requisitos para el material rodante de la granja.
 - La producción se puede programar para satisfacer la demanda porque no hay problemas de estacionalidad.
- Ambientales
 - Potencial de exportación de alimentos limpios y frescos.
 - No se requiere suelo si se utiliza hidroponía.

- Reduce el uso de combustibles no renovables empleando fuentes de energía limpias.
 - Reducción en la huella de carbono.
 - Rejuvenecimiento del ecosistema.
 - Sostenibilidad del medio ambiente.
- Sociales
 - Proporciona empleo en áreas regionales.
 - Aborda el aislamiento social en comunidades rurales remotas al proporcionar empleos en las ciudades.
 - Aumenta la demanda de contratos para trabajadores en la construcción, renovación y mantenimiento.
 - Genera nuevos trabajos en ingeniería, bioquímica, biotecnología, construcción y mantenimiento, investigación y desarrollo.
 - Fomenta un estilo de vida más holístico, donde vivienda y producción de alimentos están localizados en el mismo lugar, lo cual reduce el uso de vehículos y transporte.

Díaz (2008), en la *Guía para pequeños y medianos agroempresarios*, describe los principales objetivos que las BPA buscan cumplir, acompañadas de recomendaciones e indicadores para la verificación del cumplimiento de las siguientes buenas prácticas agrícolas:

- “Rastreabilidad
- Material de propagación y siembra
- Historial y manejo de la finca
- Gestión del suelo y sustratos
- Fertilización

- Riego
- Protección de cultivos
- Cosecha y transporte
- Salud, seguridad y bienestar laboral
- Gestión de residuos y de agentes contaminantes
- Protección ambiental
- Manejo de reclamos” (p.8).

Adicional a estas recomendaciones, tal como propone Fuentelsaz, Peiteado, Hernández, Eva Hernández, Badillo y Porcuna (2015), “se deben considerar las siguientes medidas para la mitigación del cambio climático y disminución de los efectos de gases invernadero” (p.2).

- Excluir el uso de plaguicidas y herbicidas de síntesis química, ahorrar el empleo de combustibles fósiles, además de emisiones, desde su fabricación hasta su aplicación.
- Fomentar los canales cortos de comercialización, evitar los transportes internacionales de largas distancias y, con ello, sus emisiones asociadas.
- Uso eficiente de la energía, como utilizar elementos de bajo consumo y fuentes de energía renovables.

7.3.3. Certificaciones en el comercio de hortalizas

Las empresas privadas, clientes o mercados específicos de comercialización, como vendedores al por menor, se están convirtiendo en una fuerza de mercado a ser tomada en cuenta ya que, como denotan Clemens y

Marbán (2007), “pueden significar el cumplimiento de normas adicionales a las normas y reglamentos técnicos nacionales” (p.6).

Para Guatemala, según datos del 2009 de la Organización Mundial del Comercio, existe un gran número de productos frescos (frutas y hortalizas), afectados por normas privadas cuyo principal mercado de exportación es Estados Unidos, España, Francia y Reino Unido. Siendo normas como GLOBALGAP las impuestas por empresas exportadoras a los proveedores locales que en su mayoría son pequeños productores de hortalizas. (OMC, 2009, p.2)

Luego de evaluar de forma general la situación de 22 países miembros de la OMC, se concreta que quienes imponen normas privadas en sus principales mercados de exportación son minoristas, supermercados e hipermercados como Marks and Spencer's, Metro, Primus Labs, Tesco y Wal-Mart.

7.3.4. Indicadores de gestión

Como plantea Benke y Bruce (2017), “los KPI pueden ser evaluaciones cuantitativas o cualitativas, basadas en modelos, análisis, revisión de la literatura y opinión de expertos. Además, se debe tomar en cuenta que cada KPI identificado como satisfecho, todavía se puede mejorar en el futuro” (p.23).

KPIs en la producción de hortalizas:

- Porcentaje de productividad incrementada
- Porcentaje de reducción en el costo del trabajo
- Porcentaje de reducción en la pérdida de producción
- Mayor calidad del producto

7.3.4.1. Fichas de autoevaluación

Las fichas de autoevaluación tienen como objetivo permitirle al productor conocer y analizar las condiciones en que se encuentra determinada etapa, proceso o área dentro del sistema productivo, y así encontrar el o los puntos que deben mejorar, con el objetivo de alcanzar el grado de calidad e inocuidad deseada.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. AGRICULTURA URBANA E HIDROPONÍA

1.1. Categorías de agricultura urbana

1.2. Agricultura familiar

1.3. Hidroponía

1.3.1. Cultivo en agua

1.3.1.1. Tipos de sistemas en solución

1.3.1.1.1. Sistema de solución
estática

1.3.1.1.2. Sistema NFT

1.3.1.1.3. Solución en aire

1.3.1.1.4. Solución en sustratos

1.3.2. Componentes básicos

1.3.2.1. Solución nutritiva

1.3.2.1.1. Disponibilidad de
oxígeno

1.3.2.1.2. Potencial de hidrógeno

- 1.3.2.1.3. Temperatura
- 1.3.2.1.4. Conductividad eléctrica
- 1.3.2.1.5. Interacción entre iones
- 1.3.2.1.6. Salinidad
- 1.3.3. Localización del huerto hidropónico
- 1.3.4. Ventajas y desventajas de la hidroponía

2. IOT EN LA AGRICULTURA, LA AGRICULTURA INTELIGENTE

- 2.1. IoT- Internet de las cosas
 - 2.1.1. Modelos de comunicación de la IoT
- 2.2. Redes de área amplia de baja potencia – LPWAN
 - 2.2.1. Plataformas y tecnologías basadas en LPWAN
 - 2.2.1.1. Sigfox
 - 2.2.1.2. Weightless
 - 2.2.1.3. Nwave
 - 2.2.1.4. NB-IoT
 - 2.2.1.5. LoRa
- 2.3. Especificación LoraWAN
 - 2.3.1. Banda ISM
 - 2.3.2. Configuración de red
- 2.4. Protocolos y herramientas IoT
 - 2.4.1. MQTT
 - 2.4.2. Mosquitto
 - 2.4.3. Node-Red
 - 2.4.4. Tecnologías móviles
 - 2.4.5. Base de datos en tiempo real (RTDBS)
 - 2.4.5.1. Firebase
- 2.5. Sensores de potencial de hidrógeno (pH)
 - 2.5.1. Tipos de sensores

- 2.5.1.1. Sensor de vidrio
- 2.5.1.2. Sensor combinado
- 2.5.1.3. Sensor de pH diferencial
- 2.5.1.4. Sensores de pH inteligentes
- 2.5.2. Monitoreo de pH dentro de un sistema de cultivo hidropónico

3. CALIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE HORTALIZAS

- 3.1. Administración de la calidad en producción de alimentos
- 3.2. Gestión de aseguramiento de la calidad
 - 3.2.1. Buenas Prácticas Agrícolas
 - 3.2.2. Aplicación de BPA en la cadena de producción
 - 3.2.3. Ventajas de implementar BPA
 - 3.2.4. Consideraciones para la implementación de la BPA
- 3.3. Certificaciones en el comercio de hortalizas
- 3.4. Indicadores de gestión.
 - 3.4.1. Fichas de autoevaluación

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

PRESENTACION DE RESULTADOS

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos planteados, la investigación se aborda con un alcance descriptivo porque se recolecta información y se analizan todas las propiedades y características relacionadas a las tecnologías del IoT, el pH en agua de solución en sistemas hidropónicos y la calidad de las cosechas.

El diseño es experimental, porque se involucra al grupo expuesto a la variable independiente y al grupo de control para determinar la relación causal que existe entre el monitoreo y control de la o las variables del agua de solución y la calidad y rendimiento en la producción de los cultivos cosechados.

El enfoque de la investigación es mixto, ya que se utilizan las fortalezas de la investigación cuantitativa y descriptiva para recolección, análisis y vinculación de datos tanto cuantitativos como cualitativos para tratar de responder el planteamiento del problema. La fuente de información es primaria y secundaria.

Las variables involucradas en la investigación son:

- Variables independientes
 - Nivel de pH

- Variables dependientes
 - Producción
 - Calidad

La población bajo análisis será la totalidad de la cosecha de un huerto hidropónico urbano compuesto por 6 tubos de 6 m de largo cada uno, con distanciamiento entre cultivo cada 18cm, para un total de 200 cultivos.

El método utilizado para la recolección de la información será por medio de la recopilación documental, así como la observación directa estructurada de todas las etapas del crecimiento de los cultivos hasta la cosecha. El instrumento utilizado para recolectar y registrar esta información será por medio de bases de datos digitales y listas de chequeo estandarizado que permita la medición de las variables de forma uniforme.

El proceso para alcanzar el objetivo de este diseño de investigación es el siguiente:

- Fase 1: revisión documental de las características de los sistemas de medición de variables de solución de nutrientes en huertos hidropónicos urbanos. Se define el cultivo y se establecen los requisitos que las buenas prácticas agrícolas recomiendan para la elección del lugar del huerto hidropónico urbano,
- Fase 2: desarrollo e implementación de un sistema hidropónico urbano, dividido en dos grupos: uno monitoreado de forma manual y otro bajo monitoreo remoto utilizando un sistema de IoT.
- Fase 3: desarrollo del instrumento o instrumentos para medir las variables dependientes y recolección de datos durante la etapa de desarrollo hasta la cosecha de los cultivos.

- Fase 4: presentación de resultados de los datos cuantitativos de calidad obtenidos por la implantación de un sistema de monitoreo remoto del nivel de pH agua en solución de nutrientes en un huerto hidropónico urbano.

Los resultados esperados son niveles de pH aceptables durante el tiempo del proceso productivo de los cultivos, así como el aumento en la calidad y rendimiento de las cosechas al presentar peso adecuado y porcentaje de cultivos cosechados con características físicas ideales para su consumo y comercialización.

Tabla VIII. Operativización de variables

OBJETIVO	VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	ESCALAS DE MEDICION	TIPO DE VARIABLE	VALORES ESPERADOS
Determinar que la aplicación de un sistema de monitoreo remoto de pH en solución de agua en un huerto de cultivo hidropónico aumenta la calidad y rendimientos de las cosechas.	Prevalencia del nivel de pH adecuando en la solución.	Indica el grado de acidez o alcalinidad de una disolución desde la plantación hasta la recolección de los cultivos.	Revisión del histórico de las lecturas de pH almacenadas en la BD desde la plantación hasta la recolección de los cultivos.	Coefficiente de pH entre 0 y 14	Tasa de permanencia de la solución dentro de los niveles de 5.8 y 6.5	Numero de valores de pH entre 5.8 y 6.5. / Total de datos tomados *100	De razón o proporción	Cuantitativa continua	95% -100%
	Calidad de los cultivos cosechados.	Cualidades de un producto que ofrece al consumidor entera satisfacción por el precio que está dispuesto a pagar.	Revisión visual de las características del cultivo hidropónico cosechado.	Color verde brillante	Porcentaje de cultivos con color aceptable.	No. De cultivos recolectados con color aceptable / Total de cultivos cosechados *100	De razón o proporción	Cuantitativa continua	> 80%
				Peso g	Porcentaje de cultivos con peso > 500g	No. De cultivos recolectados con peso > 500g / Total de cultivos cosechados *100	De razón o proporción	Cuantitativa continua	> 80%
				Presencia de tip burn (manchas, quemaduras)	Porcentaje de cultivos con presencia de tip burn.	No. De cultivos recolectados con presencia de tip burn / Total de cultivos cosechados	De razón o proporción	Cuantitativa continua	<5%
	Rendimiento en la cosecha.	Cultivos aptos para ser comercializados	Cuento de la cantidad de cultivos hidropónicos aptos para ser comercializados del total de la cosecha	Presencia de espigado	Porcentaje de cultivos con presencia espigado.	No. De cultivos recolectados con presencia de espigado / Total de cultivos cosechados	De razón o proporción	Cuantitativa continua	<5%
				Rendimiento comercial	Tasa de cultivos de cabeza compacta y peso mayor a 500g	hidropónicos aptos para ser comercializados / Total de la cosecha	De razón o proporción	Cuantitativa continua	95% -100%

Fuente: elaboración propia.

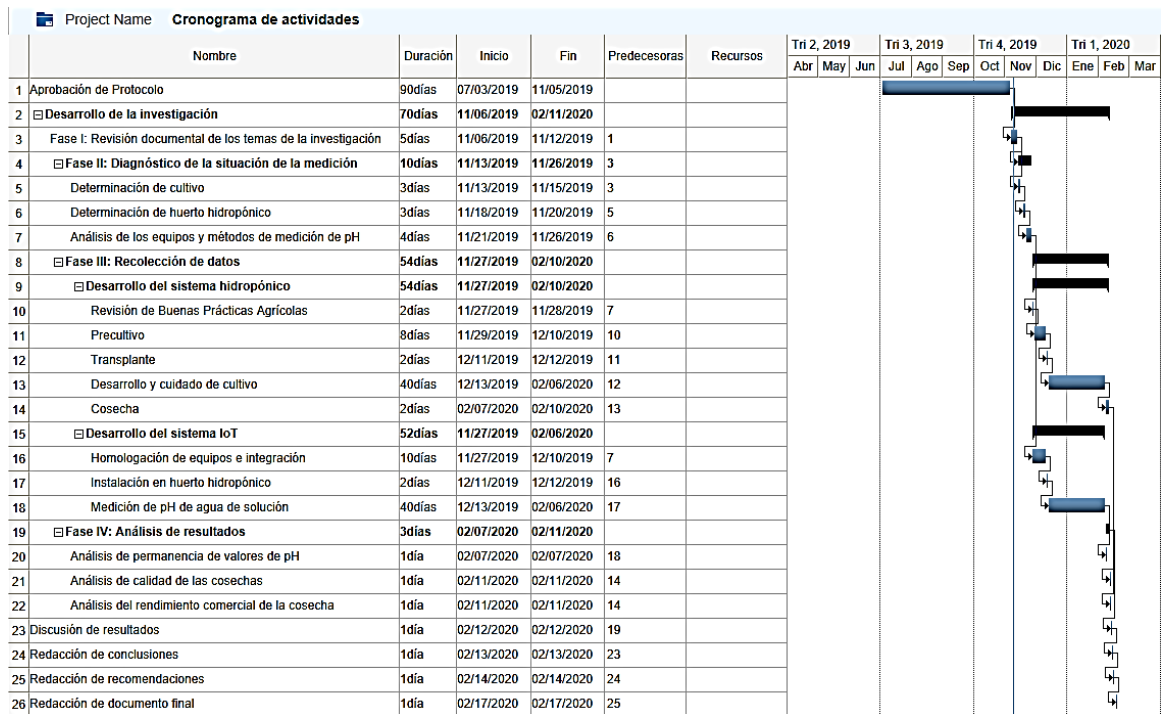
10. TÉCNICAS DE ANALISIS DE INFORMACIÓN

Se procederá a recolectar datos de forma periódica de los valores de pH del agua de solución del sistema de cultivo hidropónico del grupo bajo análisis. Posteriormente se realizará un análisis estadístico inferencial mediante pruebas paramétricas como el coeficiente de correlación de Pearson y regresión lineal, y prueba de t.

Se realizará la interpretación de los datos para estimar el efecto que tiene la variable de pH en el agua de solución en un sistema de cultivo hidropónico urbano en el rendimiento y calidad que los cultivos cosechados. Se contará con el apoyo de herramientas informáticas para su análisis, generación de gráficas y posterior presentación de resultados.

11. CRONOGRAMA

Figura 29. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para el desarrollo de la investigación se cuenta con el recurso financiero y tecnológico necesario para la propuesta de sistema de monitoreo remoto en tiempo real de las variables de pH mediante uso de de IoT en un huerto hidropónico urbano en la ciudad de Guatemala.

El financiamiento para el desarrollo de la investigación será aportado por el investigador.

Se presenta el siguiente presupuesto de gasto relacionado a la investigación:

Tabla IX. **Presupuesto para el desarrollo de la investigación**

No.	TIPO	DESCRIPCIÓN	Q
1	Material	Sistema tecnológico para telegestión del huerto hidropónico: sensor de ph, servidor, cableado, transmisores	4,000.00
2	Material	Infraestructura para sistema hidropónico urbano	2,500.00
3	Material	Insumos para huerto, semillas, solución	500.00
4	Técnico	Capacitación en hidroponía	625.00
5	Intelectual	Asesor de trabajo de investigación	2,500.00
6	Intelectual	Investigador	7,000.00
7	Humano	Operador de huerto	1,000.00
8	Varios	Gasolina, alimentación	1,000.00
TOTAL			19,125.00

Fuente: elaboración propia.

13. REFERENCIAS

1. Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica (ANMAT). (s.f.). *Buenas prácticas aplicadas a los alimentos*. Recuperado de http://www.anmat.gov.ar/portafolio_educativo/pdf/cap4.pdf
2. Beltrano, J., y Gimenez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía*. Buenos Aires, Argentina: D - Editorial de la Universidad Nacional de La Plata
3. Brown, I., y Lux Research Inc. (s.f.). *A Detailed Breakdown of LPWAN Technologies and Providers*. Recuperado de http://web.luxresearchinc.com/hubfs/Insight_Breakdown_of_LPWAN_Technologies.pdf?t=1461874447328
4. Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial, y Naranjo, F. (2010). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas* (Ed. rev.). San José, Costa Rica: CEGESTI.
5. Comisión Nacional Buenas Prácticas Agrícolas. (2007). *Especificaciones Técnicas De Buenas Prácticas Agrícolas Para La Producción De Frutales*. Chile, Chile: Gobierno de Chile, Ministerio de Agricultura.
6. Corpoica Mana Gobernación De Antioquia - FAO, Jaramillo, J., Rodríguez, V., Guzmán, M., y Zapata, M. (2007). *Manual Técnico: Buenas Prácticas Agrícolas en la Producción de tomate bajo*

condiciones protegidas. Medellín, Colombia: Dirección Seccional de Salud de Antioquia.

7. Dahlman, E., Parkvall, S., y Sköld, J. (2011). *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Oxford, UK: Elsevier/Academic Press.
8. Dolui, K., y Politecnico Di Milano. (2017). *Cloud platforms for the internet of things: how do they stack up in a real-world application?* Recuperado de https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/131959/3/2016_12_DOLUI.pdf
9. Díaz, A. (2008). *Buenas Prácticas Agrícolas: Guía para pequeños y medianos agroempresarios*. Tegucigalpa, Honduras: IICA.
10. Egli, P. (2016). *An Introduction To Mqtt, A Protocol For M2m And Iot Applications*. Recuperado de http://www.indigoo.com/dox/wsmw/1_Middleware/MQTT.pdf
11. Endress+Hauser. (2015). *pH measurement in industrial processes (Selection and engineering guide for your industry and application)*. Recuperado de https://portal.endress.com/wa001/dla/5000455/3062/000/01/CP00010C24EN1315_US%20ph%20sel%20guide.pdf
12. Evans, D., y Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG). (2011). *Internet de las cosas cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo*. Recuperado de https://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf

13. FAO y Brigada del Ejército Venezolano y el Ministerio de Agricultura y Tierras. (2004). *Manual de microhuertos en Venezuela (programa especial de seguridad alimentaria - agricultura urbana y peri urbana)*. Recuperado de http://www.innovacion.gob.sv/inventa/attachments/article/2911/doc_238.pdf
14. Gharsellaoui, B. (2019). *Internet of Things prototyping with Firebase: how to do more with less*. Recuperado de <https://www.freecodecamp.org/news/iot-prototyping-with-firebase-doing-more-with-less-2f5c746dac8b/>
15. Instituto Español de Estudios Estratégicos. (2018). *Internet de las cosas. Horizonte 2050*. Recuperado de http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_investig/2018/DIEEEINV17-2018_Internet_de_las_Cosas_Horizonte_2050.pdf
16. Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. (2018). *Waspote LoRaWAN Networking Guide*. Recuperado de <http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspote-lorawan-networking-guide.pdf>
17. Link Labs, Inc. (2016). *A comprehensive look at Low Power, Wide Area Networks*. Recuperado de <http://cdn2.hubspot.net/hubfs/427771/LPWAN-Brochure-Interactive.pdf>
18. LoRa® Alliance Technical Marketing Workgroup. (2015). *LoRaWAN™ What is it? (A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™)*. Recuperado de <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>

19. Madhumitha, M., Nikhil, N., Bhupendra, P., y International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology. (2019). *A survey on LPWAN technologies in content to IoT applications*. Recuperado de www.ijariit.com
20. Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., y Meyer, F. (2018). *Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT*. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/percomw.2018.8480255>
21. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural República de Colombia, CONSTANZA, P., y VILLEGAS, B. (2009). *Mis Buenas Prácticas Agrícolas "Guía para agroempresarios"*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (958-8536) Corporación Colombia Internacional.
22. Ministerio de Agricultura y Riego de Perú, y Sifuentes, M. (2013). *Manual para productores: Buenas Prácticas Agrícolas paso a paso*. Lima, Perú: Praise inversiones S.A.C.
23. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección General de la Granja (DIGEGRA), Carrega, E., y Enrich, N. (2014). *Guía de Buenas Prácticas Agrícolas para la producción de frutas y hortalizas frescas en Uruguay*. Montevideo, Uruguay: Dirección General de la Granja.
24. Mobberley, C., y Adafruit Industries. (s.f.-a). *Raspberry Pi Hosting Node-Red*. Recuperado de <https://learn.adafruit.com/raspberry-pi-hosting-node-red>

25. Morales, C. (2009). *Buenas Prácticas Agrícolas. Aspectos relevantes en la producción de frambuesa (Rubus idaeus L.)* Villa Alegre, Chile: Centro Regional de Investigación Raihuen.
26. Nicolas, B., y Lucie, B. (2018). *Real-Time database: Firebase*. Recuperado de https://ftp.utcluj.ro/pub/users/civan/IBD/3_EVALUARE/1_Referat/Resurse/B_2017_firebase.pdf
27. OFCOM. (2017). *Frequency bands designated for Industrial, Scientific and Medical use (ISM)*. Recuperado de https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0022/103297/fat-ism-frequencies.pdf
28. Oficina de Gestión Integral y Mejoramiento Continuo. (2016). *Buenas prácticas agrícolas*. República de Colombia.
29. Ordoñez, H. (2002). *La calidad y los agroalimentos*. En: Apuntes del Programa de Agronegocios y Alimentos. Argentina: FAUBA.
30. Organización Mundial del Comercio, Comité de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias. (2009). *Efectos de las normas privadas relacionadas con cuestiones sanitarias y fitosanitarias - recopilación de respuestas*. Recuperado de <http://www.puntofocal.gov.ar>
31. Prajzler, V., y LORIoT. (2015). *LoRa, LoRaWAN and LORIoT*. Recuperado de <https://www.loriot.io/lora-lorawan-loriot.html>
32. Raza, U., Kulkarni, P., y Sooriyabandara, M. (2017). *Low Power Wide Area Networks: An Overview*. Recuperado de <https://arxiv.org/pdf/1606.07360.pdf>

33. Red de Buenas Prácticas Agropecuarias de Argentina. (2015). *Buenas Prácticas Agrícolas: Síntesis de los Lineamientos de Base*. Recuperado de <http://www.redbpa.org.ar/>
34. Rose, K., Eldridge, S., Chapin, L., y Internet Society (ISOC). (2015). *La internet de las cosas — una breve reseña*. Recuperado de <https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2017/09/report-InternetOfThings-20160817-es-1.pdf>
35. SCIFORCE. (2019). *Smart Farming: The Future of Agriculture*. Recuperado de <https://www.iotforall.com/smart-farming-future-of-agriculture/>
36. Semtech. (s.f.). *What is LoRa? | Semtech LoRa Technology*. Recuperado de <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>
37. Sensorex. (s.f.). *pH Sensors for Water and Wastewater Monitoring | Sensorex*. Recuperado de <https://sensorex.com/ph-sensors-3/>
38. Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad, y Quintanilla, Z. A. (2014). *Guía ilustrada de buenas prácticas agrícolas para la producción con inocuidad de frutas y hortalizas, considerando el Cambio Climático*. La Paz, Bolivia: Unidad de Comunicación y Relaciones Públicas – PROAGRO.
39. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. (2010). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas*. Recuperado de <http://www.senasa.gov.ar>

40. Sigfox. (s.f.). *Sigfox Technology Overview*. Recuperado de <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview>
41. Takaya, I., Kazuki, N., y Hitachi Co., Ltd. (2018). *Introduction of the IoT Platform Node-RED and Hitachi's Activities*. Recuperado de https://events.linuxfoundation.org/wp-content/uploads/2017/11/Introduction-of-the-IoT-Platform-Node-RED-and-Hitachi_s-Activities-OSS-Takaya-Ide-_Kazuki-Nakanishi.pdf
42. Tigli, Y., y University of Nice Sophia Antipolis. (2016). *Tutorial: MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)*. Recuperado de http://www.tigli.fr/lib/exe/fetch.php?media=cours:tutorial_mqtt_mit_2015_2016.pdf
43. Tschofenig, H., ARM Ltd., Arkko, J., Thaler, D., McPherson, D., y Internet Architecture Board (IAB). (2015). *Architectural Considerations in Smart Object Networking*. Recuperado de <https://tools.ietf.org/html/rfc7452>
44. Urrestarazu, G., Berjon, M., Adams, P., Moreno, T., Salas, M., Santos, M., Varela, D. (2004). *Tratado de cultivo sin suelo*. Almería, España: Editorial Mundi Prensa.
45. Valle Hernández, L. (s.f.). *Guía de introducción a MQTT con ESP8266 y Raspberry Pi*. Recuperado de <https://programarfacil.com/esp8266/mqtt-esp8266-raspberry-pi/>

46. Viglizzo, E. (2004). *Desarrollo de una metodología compatible con la norma ISO 14000 para la eco-certificación de predios rurales*. Programa Nacional de Gestión Ambiental. INTA.
47. WWF, Fuentelsaz, F., Peiteado, C., Hernández, L., Badillo, M., y Porcuna, J. (2015). *Buenas prácticas agrícolas para la conservación de los recursos naturales*. Madrid, España: WWF/Adena.
48. Yuan, M., y IBM Corporation. (2018). *Conociendo MQTT*. Recuperado de <https://www.ibm.com/developerWorks/ssa/>