



## [211002] Diseño de un sistema de monitoreo para ganado bovino utilizando tecnología LPWAN

Laura Ximena Caicedo Roncancio<sup>a,c</sup>, Omar David Correa Villamizar<sup>a,c</sup>, Isabella Lucía Galvis Cordoba<sup>a,c</sup>, Laura Viviana Vargas Carranza<sup>a,c</sup>

Martha Ruth Manrique Torres<sup>b,c</sup>, Wilson Alonso Hernandez Martinez<sup>b,c</sup>, Juan Camilo Acosta Mejia<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup>Estudiante de Ingeniería Industrial

<sup>b</sup>Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

<sup>c</sup>Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

---

### Abstract

Cattle monitoring is an indispensable activity for the livestock sector, because it allows to know the health status and location of cattle in order to take corrective and/or preventive measures in case of any eventuality and to ensure the welfare of livestock. In the main cattle-raising regions of Colombia, this activity has been approached with conventional and ineffective tools, which is evidenced by the high numbers of cattle rustling and late detection of potentials risk situations for cattle. Despite the low level of technological tools used in this sector, the increase in Internet connectivity figures driven by the Covid-19 situation, contributes to the implementation of new technologies focused on the development of the livestock industry. Given the above, a prototype monitoring system for cattle was designed, based on LPWAN (Low Power Wide Area Network) communication technology using the LoRaWAN protocol, to monitor the variables of the cattle's condition: geographic location measured by latitude and longitude coordinates and surface body temperature in degrees Celsius. The designed system generates alarms in case of anomalies in the monitored variables, providing a control tool through the system interface and economic benefits to the farmer after its implementation. According to the structure of the Internet of Things (IoT), four layers that make up the system were established: the physical layer, the access layer, the information integration layer and the interface layer, each of which was respectively developed and integrated. Initially, the data capture tools were identified and selected for the subsequent design and development of the device attached to the bovine, which acted as the physical layer of the system. For this purpose, prioritization methodologies such as the AHP method and product engineering design were considered, in which the criteria were established with respect to the required variables of the system and the healthiness of the bovine. Subsequently, a selection of alternatives of data reception tools was made to allow the connection between the selected device and the storage software, through the programming and execution of the communication protocols according to the selection of the cloud service platform, used for the configuration and structuring of the database. Considering the aforementioned requirements, Azure SQL Database was selected for the creation of the database with structured tables that allowed an adequate flow of information. Regarding the alarm generation process, a service of the monitoring system that interacts transversally with the actors of the layers until it reaches the farmer, who receives alarms generated through text messages. Research was carried out on the conditions of potential risks in cattle, obtaining four cases of alarms that require immediate, moderate, prolonged or no intervention, depending on the case. The activation cases were built upon the following: location outside the property boundary, temperature below the minimum limits, temperature above the limits, time of alert status and variables within the established limits; these cases were necessary for the design and programming of the code that generated the alarms through the platform and allowed them to be sent to the user. In addition, the interface layer was developed, based on the research of the farmer's preferences and needs. Based on the results, the flow of information and interaction with the user in the visualization software was planned and designed. On the basis of this and the characteristics of the other layers of the system, the respective selection of the software for the interface and its development was made, considering characteristics such as usability, functionality and ease of understanding. Once the complete integration of the system was achieved, the evaluation processes were designed, based on the requirements that ranged from the accuracy of the data transferred in each layer, being acceptable according to the

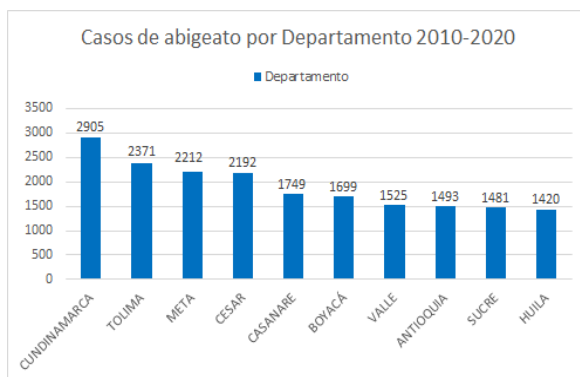
ranges established by the uncertainty intervals, to the effectiveness of the alarms, obtaining 95% as a result. The field tests were implemented in a farm located in Tibasosa, Boyacá with a bovine specimen. Finally, the selling price of the system, comprising an initial investment per device and a fixed monthly charge for the software licenses, was determined by establishing the fixed and variable costs together with the expected profit percentage of 20%. As a result, the selling price of the system per device was \$ 217,953 COP, with a monthly cost of \$122,600 COP. Linked to the above, the QFD methodology was used to determine the positioning of the designed system compared to the main competitors, obtaining as a differentiating criterion the sales price, which was on average 3.5 points higher on a rating scale of 1 to 5. Finally, for the cost-benefit analysis, the factors that represented risks in the care of cattle were evaluated, which together with the percentage of risk mitigation offered by the monitoring system of 71.75%, resulted in an annual Return on Investment (ROI) of 25,4%.

*Keywords: Bovine, cattle rustling, farmer, monitoring, location, temperature, LPWAN, interface, Internet of Things*

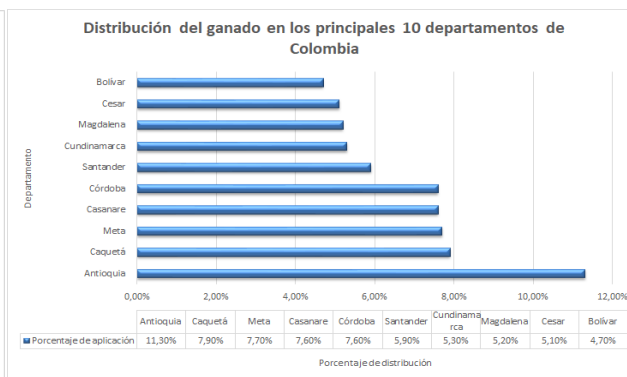
## 1. JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde hace varias décadas en Colombia, el sector ganadero viene siendo uno de los más importantes para el crecimiento de la economía nacional principalmente por la diversidad de suelos y climas que existen en cada región, lo cual permite la crianza de variedad de especies y razas de ganado bovino. Esta actividad se desarrolla especialmente en el sector rural y contribuye al fortalecimiento de pequeños y medianos ganaderos, generando gran cantidad de empleo para dicho sector. Además, es una actividad fundamental para la alimentación de los colombianos, ya que provee materia prima en la industria de los cárnicos y lácteos para el país [1]. En este sentido, la ganadería en Colombia es capaz de no solo suplir la necesidad de consumo interno sino también de generar oportunidades en el mercado internacional. En parte gracias a que el producto lácteo y el cárnico están favorablemente posicionados en el mundo por la calidad ocupando el puesto 12 y 13 respectivamente [2]. Por otra parte, la ganadería es el sector agropecuario más grande del país en términos del valor anual de producción: 4 veces el sector porcicultor, 3 veces el sector caficultor, 3.1 veces el sector floricultor y, además, representa el 21,8% del PIB agropecuario según cifras del DANE [3].

Según el Censo Pecuario realizado por el ICA en el año 2020, en el territorio colombiano la población bovina está distribuida en 665.661 predios totalizando 28\*245.262 animales, como se muestra en la *gráfica 1*. También se conoce que desde el año 1962 hasta el 2007, las cifras del hurto de ganado ascendieron a 116.141 casos registrados [4] y en el transcurrir de los últimos diez años las cifras reportadas en la Policía Nacional ascienden a 19.047, donde los diez departamentos más afectados se presentan en la *gráfica 2*. Además, en el 2017 se registran hurtos de 700.000 animales, lo que representa un valor de \$1,9 billones en pérdidas anuales que incluyen los derivados, como lo son las vísceras y cueros [5]. Lo mencionado anteriormente señala que el Sistema de Inspección y Vigilancia es deficiente y remarca la necesidad existente de buscar estrategias y herramientas que estén enfocadas en apoyar al ganadero ante un posible caso de abigeato, en conjunto con la trazabilidad de la carne comercializada.



Gráfica 2. Número de casos reportados de abigeato en Colombia. Autoría propia



Gráfica 1. Distribución del ganado en los principales 10 departamentos en Colombia. Autoría propia.

Las prácticas más recurrentes de hurto son: el carneo, arreo, atraco, cachilapeo, la falsificación y robo masivo, lo que conlleva a que los sacrificios ilegales se realicen de maneras poco sanitarias, debido a, la manipulación, transporte y refrigeración de la carne, siendo el carneo la modalidad más frecuente [6]. Según

los reportes [6], se tiene que el 75% de los hurtos fueron cometidos en fincas y predios similares, teniendo menor proporción el robo de ganado transportado por vías públicas y carreteras. Los hurtos fueron cometidos en un 75,53% sin la utilización de armas de fuego o cortopunzantes [7] y el 90% de estos no fueron reportados por amenazas a los mismos ganaderos [8]. Según informes de Fedegán, el aumento de casos de abigeato en el país preocupa a pequeños y medianos ganaderos, ya que deja pérdidas anuales al sector por 400 mil millones de pesos [9]. Cabe resaltar que, los ingresos de los ganaderos no solo dependen de la producción de leche y/o carne, sino también del costo de la res, manutención, alimentación y la mano de obra. Cuando ocurre un caso de abigeato, se presentan pérdidas que dependen del precio por kilo de ganado, el cual está en un rango promedio de \$4000 y \$5000 [10], donde el peso de un bovino al momento de ser sacrificado oscila entre los 400kg a 600kg [11], siendo esta una de las razones por las cuales es necesario el monitoreo de los bovinos como una alternativa de prevención.

El monitoreo constante de los bovinos permite ahorrar tiempo e identificar el estado de salud del animal. Es decir, además de permitir al ganadero conocer la ubicación actual de su ganado, le permite identificar si se presenta algún problema relacionado con el aumento o disminución de la temperatura corporal [12]. La monitorización de la temperatura y sus oscilaciones son indicadores claves del bienestar de los animales, estos pueden ser utilizados para la evaluación del estrés térmico, la detección temprana de fiebre o el fallecimiento del animal, donde la temperatura interna promedio de un bovino se encuentra en 38,5°C y la de un ternero en 39,5°C con variaciones normales de  $\pm 1^\circ\text{C}$  [13]. A su vez, existen también registradores que permiten el almacenamiento de datos de temperatura y se pueden colocar en la piel del animal o ser implantados en el subcutáneo [14]. Ligado a lo anterior, se han reportado varios casos en donde las reses han muerto debido a fallas en el terreno (agujeros en los que caen y por su peso no pueden salir), ataques de animales, lesiones de algún tipo, intoxicación, enfermedades en el sistema nervioso, entre otras [15]. Dentro de los riegos y enfermedades más comunes que puede sufrir el bovino y los cambios de temperatura interna que éstas pueden provocar se encuentran:

Tabla 1. Rango de temperatura enfermedades y situaciones de riesgo. Autoría Propia. [16]

Enfermedad o situación de riesgo	Rango de Temperatura*
Estrés térmico	40-41 °C (Moderado a severo)
Deshidratación - Diarrea viral bovina	40-41 °C (Puede causar la muerte en 48 horas)
Pos-parto	38,5°C - 39 °C
Preñez	39.5 °C
Metritis	>39,4°C
Fiebre lechosa o hipocalcemia	< 38°C
Muerte	>42°C

\* Datos con base en la temperatura interna del bovino.

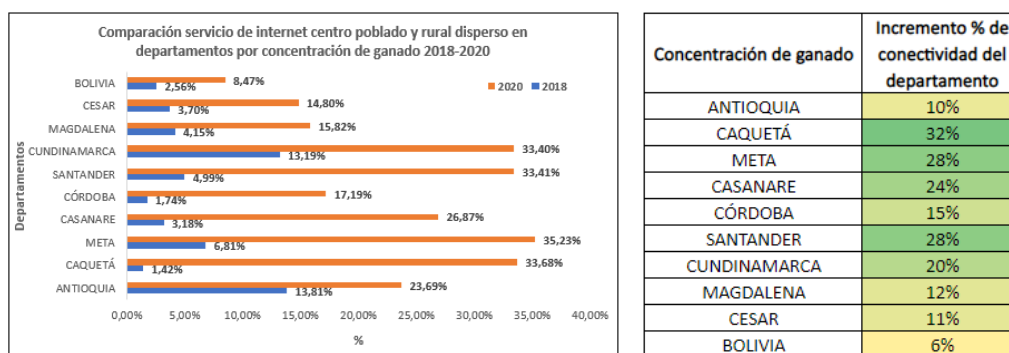
Es importante mencionar que, aunque se establezcan rangos en la temperatura del ganado por posibles enfermedades, factores como el movimiento de los animales por algún tipo de actividad, época del año, temperatura ambiente, hora del día, distancia de traslado y acceso a fuentes de agua pueden incrementar la temperatura corporal entre 0,5 y 3,5°C. Durante un día, los bovinos invierten aproximadamente 14 horas descansando y 6 de esas horas rumiando, el tiempo restante en promedio se divide entre: 4 horas caminando, 5 horas y media alimentándose y 30 minutos bebiendo agua [17]. El monitoreo de la temperatura de los bovinos en tiempo real le permite al ganadero conocer y tomar decisiones rápidas según la información presentada, ya que permite mejorar el bienestar del animal y la detección temprana de potenciales situaciones de riesgo para la salud del animal [18].

Los avances tecnológicos en la ganadería colombiana están orientados a la trazabilidad del hato, lo que permite monitorear diferentes aspectos de las reses como: inventario de animales, producción de leche y/o carne, reproducción, salud, genética, costos de ganadería y modelos de predicción y simulación [19]. No obstante, a nivel mundial se han desarrollado nuevas herramientas de monitoreo integradas con comunicaciones IoT, estas se pueden definir como la digitalización a través de tecnologías de procesamiento de datos, software inteligente y sensores, desde los proveedores hasta los clientes [20]. Algunas de las opciones para el monitoreo en el sector ganadero se encuentran en países como China, Estados Unidos, España, Uruguay y Brasil. En la *tabla 2* se muestra la brecha financiera entre importar la alternativa y producirla en Colombia.

Tabla 2. Características de sistemas de monitoreo. Autoría Propia.

País	Medio	Servicio	Descripción	Valor	Unidades
España	Importar	Sigfox y GMS multioperador	Servicios de monitoreo, localización, detección de robos, detección de celos y detección de partos. [21]	\$674.000 COP	Anual / animal
Estados Unidos	Importar	Smatrnet	Brindar una red de servicios de trazabilidad, monitoreo y reporte de anomalías en tiempo real. [22]	\$410.000 COP	Anual / animal
China	Importar	Dispositivo	Monitoreo para ganado bovino. [23]	\$224.000 COP	Por animal con envío incluido
Uruguay y Brasil	Importar	Plataforma	Mejorar la seguridad y protección de los rebaños de ganado, al tiempo que reduce el impacto ambiental de los ganaderos y brinda trazabilidad a lo largo del ciclo de vida del bovino. [24]	\$186.900 COP	Mensual/ animal
Colombia	Comprar	Plataforma	Servicios de monitoreo y detección de celo [25]	\$125.000 COP	Anual / animal
	Producir	Diseño del dispositivo basado en el protocolo LoRaWAN	Opción viable y económica en el mercado, con posibilidad de utilizar en diferentes partes del territorio colombiano, teniendo en cuenta limitaciones de conexión a internet. [26]	\$105.000 COP	Por animal

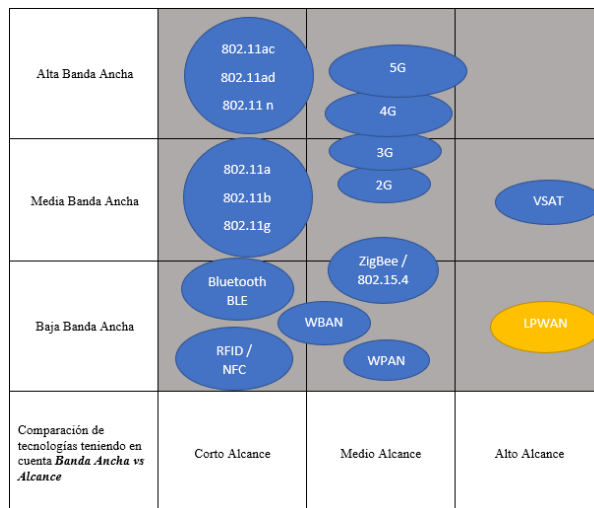
Dentro de las características de estos sistemas de monitoreo se encuentra la integración a partir de la estructura del Internet de las Cosas (IoT), por lo cual es necesario el acceso al servicio de internet. A nivel nacional, el alcance del servicio de internet en el territorio ha tenido un crecimiento que se vio impulsado por la coyuntura ocasionada por el Covid-19 y la necesidad inmediata de la población para continuar con las actividades cotidianas. Según los diferentes proyectos e inversiones que están siendo ejecutados por el Gobierno Nacional, se plantea la meta de conectar a más del 70% del país para el 2022 y un aumento del 51% de nuevas conexiones de internet fijo, entre el primer trimestre de 2020 y el mismo trimestre del 2021 [27]. Según el Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 y la Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) 2020, ambos estudios realizados por el DANE, reflejan el auge en el acceso a los servicios de internet, donde a nivel departamental en zonas con déficit de acceso, se implementaron conexiones fijas. Los casos más representativos son: Guaina con un incremento del 166%, Amazonas con 162% y Putumayo y Vichadas con 68%. Ahora bien, dentro de los departamentos que tienen mayor concentración de ganado y afectación por casos de abigeato registrados, se presentaron incrementos favorables de acceso a internet en las zonas centro poblado y rural disperso entre 2018-2020, los cuales alcanzaron aumentos de hasta el 37% [28] [29]. Los datos se encuentran en el *Anexo I*.



Gráfica 3. Estadísticas servicio de internet regional e incremento de conectividad. Autoría propia

En el sector de monitoreo enfocado en animales, ya existen diferentes tecnologías inalámbricas como LPWAN, Wi-Fi, Bluetooth, 3G o Zigbee que, en conjunto con IoT, garantizan la transmisión y conexión de los dispositivos de manera interna y externa [30]. Estas tecnologías poseen una serie de componentes que trabajan de manera conjunta para lograr la efectiva comunicación. Inicialmente, se tiene el dispositivo de recolección de datos, encargado de detectar la ubicación del animal en un área delimitada. Este dispositivo está compuesto por: un sistema de alimentación de energía; microprocesadores encargados de garantizar el

funcionamiento y ejecución de los comandos programados y módulos GPS u otros similares encargados de proporcionar la ubicación exacta del animal. Además, se tiene una puerta de enlace, la cual es la encargada de conectar la información recolectada por el dispositivo, con la interfaz del usuario mediante el servidor. La banda ancha, el alcance de los dispositivos, la precisión, la duración de la energía y otras variables varían dependiendo de las puertas de enlace, dispositivos de ubicación y del protocolo de tecnología y comunicación usados, ver *gráfica 4*.



*Gráfica 4. Comparación de las tecnologías por su Banda ancha y Alcance [30]. Autoría Propia.*

Con base en la comparación de las principales tecnologías, ver *Anexo 2*, se determina que el protocolo LoRaWAN basado en la tecnología LPWAN, es uno de los más eficientes para la transmisión de datos en redes inalámbricas, con comunicación de amplio alcance a velocidad de transmisión baja que abarca 0,25 a 12,5 kbps, dependiendo del rango y duración del mensaje. Además, cuenta con una cobertura de 2-15 km en áreas rurales y 1-5 km en áreas urbanas y está diseñado para un bajo consumo de energía. De igual manera, el protocolo ofrece protección de datos, con posibilidad de actuar en redes de alcance local, regional y nacional. Se compone por dos elementos principales: el dispositivo remoto que portará el animal para recolectar los datos en el campo y transmitirlos y un Gateway que se encarga de captar y procesar la información, utilizando un espectro radioeléctrico de baja complejidad a nivel técnico [31]. La recepción de datos se realiza por periodos de tiempo enviando información por paquetes, siendo esta su principal desventaja, además no permite la transmisión de datos de manera simultánea. Por otra parte, la tecnología Zigbee, basada en redes inalámbricas de área personal WPAN, se puede considerar como una alternativa ya que tiene características que permiten: comunicaciones con baja tasa de envío de datos, maximización de la vida útil de las baterías, topología de red de malla con fácil integración y velocidad de transmisión de datos en el rango de 20-250 kbps que dependen de la frecuencia de la banda utilizada. Sin embargo, su distancia de alcance es baja, ya que tiene una cobertura de 10-100m [32].

Basado en la comparación anterior, se determina el uso de soluciones tecnológicas integradas usando el protocolo LoRaWAN basado en la tecnología LPWAN. Esta puede ser aplicada en zonas ganaderas, de tal manera que permita controlar la seguridad de los bovinos, monitoreando su ubicación en tiempo real y su temperatura corporal superficial con la finalidad de notificar cualquier anomalía, posible riesgo de abigeato, para beneficio del ganadero. Después de lo previamente expuesto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo diseñar un sistema de monitoreo que permita determinar la ubicación y temperatura corporal superficial del ganado bovino en tiempo real mediante el uso de herramientas tecnológicas basadas en tecnología LPWAN?

## 2. ANTECEDENTES

La localización de objetos, personas, vehículos e incluso animales se realiza con apoyo de los sistemas de monitoreo, los cuales se componen por tres capas que integran un sistema de posicionamiento y uno de información incluyendo finalmente la interfaz con el usuario como se puede observar en la *gráfica 5*. Estos

sistemas cuentan con diferentes aplicaciones, como la geolocalización y control del ganado bovino, sin embargo, la implementación de tecnología en la ganadería es mínima en el país y aún se recurre a métodos de identificación tradicionales como la marca de piel o acorralamiento. A continuación, se presenta una clasificación y descripción de diferentes sistemas de monitoreo de acuerdo con los elementos dentro de cada capa que integran el sistema, por otra parte, en el *Anexo 3* se observan las soluciones comerciales que se encuentran actualmente en el mercado.



Gráfica 5. Composición de los sistemas de monitoreo. Autoría propia.

En el trabajo de Cangrejo y Hernández [31], se realiza un sistema de apoyo a la prevención del abigeato de ganado bovino utilizando tecnología IoT y cloud con el objetivo de desarrollar un plan empresa llamado Bovino Sicuri, que ofrecerá un producto que recolecte, almacene y gestione información sobre la permanencia del ganado en un área definida y esta sea almacenada en la nube. Dicho sistema de monitoreo se desarrolla en las zonas ganaderas de Une, Cundinamarca y permite a los ganaderos tener información en tiempo real sobre la ubicación de los animales y a su vez desarrollar una cerca virtual con las características del terreno para la activación de una alarma cuando algún animal salga del mismo.

En el trabajo de Benítez Silva [33], se desarrolla el uso de una red LPWAN como herramienta que permite la transferencia de información referente a la posición y temperatura de un animal bovino. Esta red se usa como recurso de control, permitiendo al usuario conocer la ubicación de sus bovinos y su temperatura corporal, para así poder analizar el comportamiento del animal. Este sistema está conformado por un dispositivo que se encuentra en un collar adherido al cuello del animal, el cual es el encargado de contener el sensor de temperatura y el módulo GPS. Los datos de la ubicación y temperatura son enviados al Gateway quien los almacena y transmite a la interfaz para la adecuada lectura del usuario.

En el artículo de Jiménez, R., Argote, I. y Meza, C. [34] se realiza una investigación, diseño e implementación de un dispositivo hardware en una plataforma tecnológica para el rastreo del ganado en ambientes de rurales, convirtiéndose en una estrategia tecnológica que alerta sobre el posible hurto del ganado. El prototipo monitorea la georreferenciación en bovinos, mediante un dispositivo móvil alojado en el cuello del animal en función de collar y un dispositivo administrador que se encarga de adquirir, registrar y transmitir inalámbricamente la variación de temperaturas. Un computador analiza y representa la información relacionada con los patrones normales de temperatura en tiempo real.

El trabajo [35] desarrolla una metodología para la aplicación de tecnologías de georreferenciación en el sector ganadero de Colombia. La propuesta se basa en metodologías ágiles y desarrolla cuatro etapas secuenciales que guían al ganadero para la integración de estas tecnologías en su finca. La etapa inicial identifica y caracteriza los requerimientos del ganadero, aplicando una adaptación del Quality Function Deployment (QFD), de acuerdo con los resultados, se propone el uso del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para seleccionar el dispositivo que se ajuste a los criterios del ganadero. La segunda etapa incluye la compra

del dispositivo adecuado en función de los conocimientos de la etapa anterior. La tercera etapa orienta al agricultor en la prueba del dispositivo seleccionado, y finalmente, en la cuarta etapa, se presenta una propuesta de cómo analizar los datos obtenidos por el dispositivo de georreferenciación.

### **Protocolo de comunicación inalámbrica/Capa física**

En [31] y [33] se implementa el protocolo LoRaWAN que consiste en la transmisión de los datos recolectados por la capa de sensores del sistema de monitoreo a través de la red LoRaWAN directamente al Gateway LoRaWAN para finalmente ser enviada dicha información en el servidor mediante TCP/IP. Para el desarrollo del trabajo [22], se usaron nodos sensoriales compuestos principalmente por un Modem LoRaWAN (encargado de la conexión con el Gateway) y un microcontrolador, este último se encarga de coordinar las acciones necesarias que se realizan en cada nodo, como la captura de datos de temperatura y localización, que es posible gracias a los módulos de temperatura y GPS integrados. El Gateway, compuesto por una Raspberry y un módulo Gateway, es quien recibe todos los datos provenientes de los nodos, los procesa y almacena para que luego, el servidor HMI sea quien depure y seleccione los datos necesarios. La conexión entre el Gateway y la interfaz se realiza por medio de un receptor Wifi adaptado a la Raspberry pi V2. Para la interfaz de visualización se hace uso de un computador portátil donde el usuario puede acceder a hacer las consultas.

En el artículo [34] se diseñó un sistema computarizado capaz de monitorear al animal mediante un componente electrónico basado en tecnología de radiofrecuencia, el cual a su vez se comunica con el software que permite decodificar la señal emitida del dispositivo electrónico situado en el animal. Este sistema computarizado consta de varios componentes, entre estos están: un microprocesador, un Módulo Xbee transmisor, un módulo Xbee receptor, un Buzzer, que es el encargado de enviar una alarma en caso tal de que los datos no estén siendo enviado al sistema y un software que recibe información por el puerto USB al equipo que hace las veces de servidor de aplicaciones. se diseñó un sistema computarizado capaz de monitorear al animal mediante un componente electrónico basado en tecnología de radiofrecuencia, el cual a su vez se comunica con el software que permite decodificar la señal emitida del dispositivo electrónico situado en el animal.

### **Dispositivo de monitoreo/ Capa física**

Por una parte, se propone el uso de collares en [31] para determinar la ubicación en tiempo real del ganado bovino, dispositivo compuesto por una caja protectora para el transceptor LoRaWAN/GPS Shield v95 teniendo como características de espectro ultra largo, inmunidad a transferencia y bajo consumo de energía. Por otra parte, en el artículo [34], se usa un dispositivo integrado de dos sensores, uno para medir la temperatura corporal del bovino y otro para medir la reflexión de la luz que se genera cuando el dispositivo esta contra el cuerpo del animal, además, integra el módulo de trasmisión y el microprocesador. Todos estos componentes están dentro de una pequeña caja de plástico que los protege del clima externo. Esta caja está unida a un lazo para funcionar como un collar para el bovino.

En el trabajo [26] se diseñó un dispositivo electrónico utilizando una red de comunicación LoRaWAN, este dispositivo captura las señales físicas de interés en los bovinos relacionadas con las variables de ubicación y temperatura corporal mediante el diseño. Se diseñó y realizó un sistema de tres nodos que permiten medir la temperatura y coordenadas en un bovino, con el fin de conocer y monitorear su estado y determinar situaciones de riesgo para el animal como prevención del abigeato. El funcionamiento del sistema requiere de la alimentación de los nodos para la captura de información relacionada con la temperatura registrada por el sensor y las coordenadas entregadas por el módulo GPS. Una vez se obtienen datos válidos, se transmite la información mediante una red LoRaWAN aproximadamente cada 5 minutos y finalmente, esta información es visualizada en la aplicación NodeRED.

## **Tecnología cloud/ Capa intermedia**

En el trabajo [31] se utiliza la plataforma The things network el cual permite el desarrollo del servidor del sistema y su aplicación móvil donde esta última es conectada a la nube de Amazon para la administración de datos través de su servicio complementario de Elastic Beanstalk, el cual recibe la información de la base de datos de DynamoDB, entidad que ofrece múltiples opciones de almacenamiento según las necesidades.

En el trabajo [33], el sistema debía garantizar una conexión estable entre el Raspberry Pi y un computador portátil. Para esto, se usó una red Wifi y se definió un IP para cada una de las dos partes conectadas. Una vez configurada esta red se procedió a diseñar la interfaz de visualización, con todos los códigos relacionados en PHP para el acceso a la base de datos y lectura de estos. Otro factor que se tuvo en cuenta fue la forma de almacenamiento de los datos recibidos en el Raspberry, la cual fue por medio del servidor de base de datos MySQL para integrar el lenguaje PHP. Además, se utilizó una API de Google Maps para desplegar la ubicación de los nodos remotos.

De igual manera que el anterior, en el artículo [34] se utiliza MySQL para el montaje de la base de datos y Visual Basic.NET 2010 para el desarrollo del proyecto, estos permiten el desarrollo de formulario y ventanas que hacen más amigable la interfaz para el usuario. La plataforma que se usó fue Windows 7 por su compatibilidad con la herramienta de desarrollo. Para el hardware se necesitó un computador personal, un puerto USB, un cable RS232 con puerto USB y una fuente de poder.

## **Investigaciones Implementación**

Para la integración del sistema en [20] y su posterior implementación primero se realiza el empalme de los sensores con su respectiva configuración y adecuarlo al dispositivo que se asigna al animal, se procede a la instalación del Gateway en una zona con acceso a internet requerido para la actualización de datos en la aplicación web a la que el ganadero tiene acceso.

La aplicación del sistema en el trabajo [33] se realizó en campo, sin embargo, el sistema no fue implementado con un animal. Para comprobar la funcionalidad del sistema, se procedió a instalar un Gateway en un lugar de aproximadamente 7 metros de altura y a realizar envíos de información (temperatura y geolocalización) con el prototipo del dispositivo. De acuerdo con los resultados obtenidos, el sistema tiene un alcance de 500 metros. De igual manera, se realizaron las pruebas para la interfaz del usuario, donde se evidenció un correcto análisis y visualización de los datos almacenados.

La implementación del prototipo en el artículo [34] se llevó a cabo en la finca ganadera Bella Vista ubicada en la vereda Mapachico en el municipio de Nariño. Dentro de los resultados obtenidos están: la transmisión de información referente a la ubicación del animal, que fue comprobada mediante el software y permitió conocer el historial del comportamiento del animal en el terreno, los datos del propietario, la identificación del bovino y las pruebas del sensor de temperatura, donde se definió un rango y se indicó si la temperatura del bovino se encontraba dentro de este rango cada determinado tiempo. Según los resultados obtenidos a través de la experimentación llevada a cabo con el sistema de monitoreo electrónico, se aportó en el proceso de vigilancia continua de los bovinos en la finca de estudio.

En el estudio realizado [36] para la evaluación de la toma de temperatura y parámetros fisiológicos en una ganadería lechera con bovinos adultos y primerizos, durante 2 meses de época seca y de lluvia. Se registraron parámetros del ambiente como: la temperatura y humedad relativa; y fisiológicos como: la tasa respiratoria, temperatura rectal y superficial y producción láctea, con el objetivo de evaluar las afecciones por el estrés calórico que es ocasionado cuando las vacas no pueden disipar el calor suficiente para mantener su temperatura interna por debajo de los 38,5°C. Esta afección se presenta generalmente en algunas regiones del trópico que mantienen temperatura media entre los 25°C y 35°C la mayor parte del año. El estrés calórico es un desencadenante directo que trae afectaciones en el potencial productivo del ganado ya que, con aumentos superiores a 1,2°C de los rangos estables de temperatura, se reduce la producción de leche de aproximadamente 6 litros. A su vez, en el estudio se determinó que la temperatura rectal de los bovinos estuvo entre los 38°C a 39°C dependiendo de la hora de medición y condiciones climáticas, donde los bovinos

primerizos tuvieron una temperatura significativamente mayor que los adultos, alcanzando una temperatura de hasta los 40°C. Para la temperatura superficial se obtuvieron valores inferiores, puesto que la grasa subcutánea es la primera barrera frente a la pérdida de calor dependiendo del grosor entre el interior del organismo y la superficie según la longitud del pelo, este valor también puede verse afectado por efecto del viento y de la lluvia. En las pruebas, se determinó el valor mínimo en 31°C, donde se ha demostrado que la temperatura superficial sin radiación directa no muestra diferencias significativas, opuesto a la radiación directa, que presentó promedios diarios en los bovinos primerizos de 36,17°C y en los adultos de 36,02°C, sin la obtención de registros superiores a 37°C. Finalmente, se determinó que el control de la temperatura tiene gran importancia para el ganadero, ya que temperaturas por encima del rango normal requerirán de 6L a 8L más de agua por cada grado de temperatura, lo cual garantizaría el estado correcto del bovino.

El trabajo de investigación de la Universidad Científica del Sur [37], demostró que el termómetro infrarrojo se utilizó como alternativa para medir la temperatura cutánea, en diferentes regiones del cuerpo en 30 vacas raza Holstein expuestas a radiación solar y bajo sombra en establos. Los autores determinaron que la temperatura dependió del color de piel que presenta el animal, obteniendo que en zonas del cuerpo no pigmentadas se obtuvieron valores bajos de  $32,22 \pm 0,611^\circ\text{C}$ , mientras que en zonas con pigmentación oscura la temperatura varió entre  $36,13 \pm 0,838^\circ\text{C}$ . Este estudio indicó que la obtención de la temperatura cutánea puede servir para indicar el estrés calórico en aquellas vacas que fueron expuestas a radiación solar y se determinó al termómetro infrarrojo como instrumento de control de la temperatura corporal confiable y preciso.

### 3. OBJETIVOS

*Diseñar un sistema de monitoreo para ganado bovino que permita determinar la ubicación y temperatura corporal en tiempo real de las reses usando tecnología LPWAN.*

- Determinar las herramientas tecnológicas necesarias para la recolección y emisión de datos dentro del sistema de monitoreo, usando la tecnología LPWAN.
- Desarrollar la capa intermedia que permita la comunicación y administración de datos del sistema de monitoreo
- Desarrollar la interfaz para el usuario del sistema de monitoreo, basado en las necesidades del ganadero.
- Evaluar funcionalmente el sistema de monitoreo mediante pruebas y análisis.
- Determinar el costo-beneficio esperado del sistema de monitoreo para el ganadero.

### 4. METODOLOGÍA

El desarrollo del prototipo de un sistema de monitoreo para ganado bovino se estableció mediante la arquitectura basada en la tecnología de Internet de las Cosas (IoT) en conjunto con la tecnología LPWAN, los cuales permiten el enlace de múltiples dispositivos hiperconectados. Para la implementación del prototipo, se seleccionó la infraestructura para la capa física y para el sistema integrado, de tal forma que permitió así la recolección y gestión de la información, mas no un escalamiento de la tecnología y su alcance. A partir de esto, se realizó una división del sistema en cuatro capas: Capa de física, Capa de acceso, Capa de integración de la información y Capa de interfaz. Cada una de las capas será desarrollada y evaluada a lo largo de los capítulos planteados. A continuación, se brinda un panorama general de cada una de las capas:

- *Capa física (Dispositivo)*: esta capa se encarga de la captura de datos mediante el dispositivo que se encuentra adherido al bovino. Este dispositivo se compone de los sensores y controladores que están instalados en una placa de circuito impreso (PCB) y a su vez dentro de un case protector, el dispositivo se encarga de recolectar datos del bovino referentes a temperatura, coordenadas, referencia del nodo y potencia. Los datos son transmitidos posteriormente al Gateway el cual hace parte de la capa física del sistema.
- *Capa de acceso (Protocolos de comunicación)*: la capa de acceso se encarga de transmitir la información recolectada en la capa física, mediante la transformación de los datos usando diferentes

protocolos de comunicación como los son: LoRaWAN y MQTT. La información recolectada por cada nodo se transmite al Gateway mediante LoRaWAN. Posteriormente, esa información es transmitida a los servidores mediante el protocolo MQTT desde la aplicación Node-RED.

- *Capa de integración de la información (Base de datos y servidor):* es la capa encargada de la administración y programación de los datos recibidos. Aquí la información es estructurada según los requerimientos para posteriormente ser enviados a la interfaz de usuario. En esta capa se establecen las condiciones necesarias para el sistema de las alarmas, el almacenamiento estructurado de los datos mediante tablas y finalmente la recepción de las consultas requeridas. También se realiza la programación para el envío de mensajes de texto al usuario en caso de activación del sistema de alarmas.
- *Capa de interfaz:* esta capa permite la visualización e interacción del ganadero con la información del sistema de monitoreo por medio de tablas, gráficos, mapas del terreno, alarmas e información de interés. Esta información se actualiza en tiempo real en intervalos de aproximadamente 5 minutos. A su vez, el ganadero recibe un mensaje de texto en su teléfono móvil con la información relacionada, cada vez que se active alguno de los casos programados de alarma.

## 5. DETERMINAR LAS HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS NECESARIAS PARA LA RECOLECCIÓN Y EMISIÓN DE DATOS DENTRO DEL SISTEMA DE MONITOREO, USANDO LA TECNOLOGÍA LPWAN

### 5.1 Identificación de los datos enviados y recibidos por el sistema

El desarrollo de este sistema de monitoreo se enfoca en dos principales variables, la ubicación del dispositivo adherido al bovino y la temperatura superficial del animal. Estas dos variables son obtenidas mediante el sensor de temperatura TMP102 Texas Instruments y el módulo GPS Quectel L80 incluidos en el diseño de la tarjeta electrónica del dispositivo.

La ubicación del bovino es una variable que permite conocer el punto exacto donde se encuentra el animal dentro de un área específica, identificando el recorrido que realiza en el día, los sitios que frecuenta o si el bovino se encuentra fuera del área. Con estas coordenadas se pueden establecer puntos específicos para identificar el comportamiento de los bovinos y establecer límites del terreno, que pueden generar alertas que permiten al ganadero actuar de manera rápida ante situaciones de riesgo que se presenten cuando el bovino excede el límite. La temperatura corporal superficial permite monitorear el estado de salud del animal conociendo los valores que pueden representar situaciones de riesgo, causadas por posibles enfermedades. Un valor de temperatura por debajo de los límites puede significar muerte del animal, situación que debe ser tratada en el menor tiempo posible. Por el contrario, un valor de temperatura superficial superior al límite establecido puede significar un síntoma de fiebre que se relaciona con diferentes enfermedades y requiere intervención. El envío de estos datos se realiza de manera conjunta y se incluyen otras variables de importancia relacionadas con el análisis del sistema.

Tabla 3. Variables enviadas por el sistema. Autoría propia

Variables	Descripción
<i>Coordenadas geográficas</i>	Para la obtención y lectura de las coordenadas geográficas se usa el método clásico, donde se requiere un dato de longitud y un dato de latitud, en este caso el dato de altitud no es necesario al tener como referencia la esfera de la Tierra.
<i>Temperatura</i>	La temperatura superficial de un bovino es un dato significativo para identificar el estado de salud de este. El dato tomado mediante el sensor se encuentra alineado con el sistema internacional de unidades, expresado en grados Celsius (°C).
<i>Fecha y hora</i>	La fecha y la hora son información fundamental para identificar que los datos están siendo enviados en tiempo real y son registrados de manera adecuada dentro de la base de datos, para su posterior análisis. La fecha se presenta como Día Mes Año y la hora se encuentra en horario militar de esta manera HH:MM:SS siendo h: hora, m: minuto y s: segundo.
<i>Zona horaria</i>	Este parámetro permite conocer la zona horaria en la que se están tomando los datos

	recibidos por el sistema.
<i>Referencia del nodo</i>	Este parámetro permite identificar la referencia del nodo del cual se están recibiendo los datos, para conocer el bovino que puede estar presentando alteraciones o anomalías en el monitoreo de las variables.
<i>Potencia</i>	Identifica la potencia de recepción de los datos enviados mediante el protocolo LoRaWAN hasta el Gateway. Esta potencia debe estar dentro de un rango mayor a -120 dBm para que no exista distorsión en la decodificación de datos. El dBm es una medida de relación expresada en decibelios, relativa a un milivatio. También es un parámetro que sirve para dar un adecuado uso de la energía de acuerdo con la distancia entre el nodo y el Gateway.

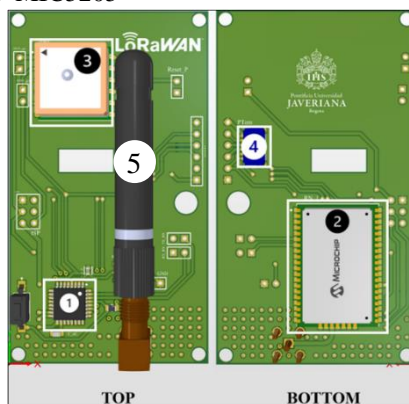
Estos datos son transferidos a Node-RED, la cual es una herramienta de programación visual que muestra las relaciones y funciones, y permite al usuario programar sin tener que escribir líneas de código. Dentro de Node-RED se pueden añadir o eliminar nodos y enlazarlos entre sí con el fin de conectar diferentes aplicaciones y protocolos para visualizar y transferir datos, como es el caso de este sistema [38].

## 5.2 Especificación de las herramientas de la capa física del sistema

### 5.2.1 Especificación dispositivo electrónico

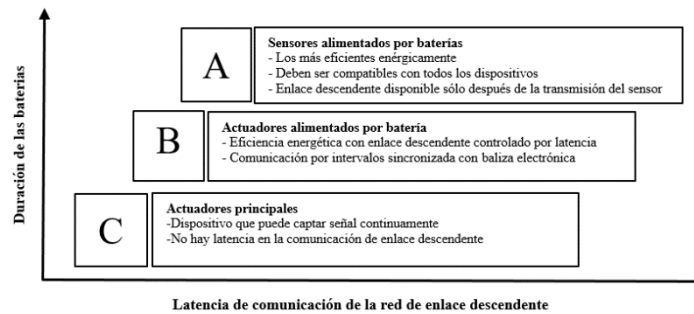
Basados en la tecnología de comunicación LPWAN (*Low-Power Wide-Area Network*) y en el protocolo de comunicación LoRaWAN seleccionados para el desarrollo del prototipo del sistema, se realizaron las respectivas especificaciones. El control de acceso al medio del protocolo LoRaWAN, es la modulación LoRa o capa física del sistema de monitoreo, en donde sus componentes integran el nodo recolector de los datos de temperatura y ubicación, usando la comunicación Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART). Para la implementación y diseño del sistema de monitoreo planteado, se seleccionó un nodo desarrollado por estudiantes de pregrado de la Pontificia Universidad Javeriana en el trabajo de grado [26]. Este nodo fue seleccionado mediante una matriz con diferentes criterios y especificaciones, *ver anexo 2*. Dentro de las principales ventajas del nodo seleccionado están: posibilidad de realizar modificaciones al ser de código abierto, bajo consumo, amplio alcance, bajo costo, uso de tecnología LPWAN y protocolo de comunicación LoRaWAN. El nodo seleccionado y su distribución en la PCB, *ver gráfica 6*, han usado como criterios principales de selección: el tamaño, el costo de uso y la adquisición de los componentes.

- Microcontrolador ATmega328PB (1)
- Transceptor LoRaWAN RN2903 (2)
- Módulo GPS (Global Positioning System) Quectel L80 (3)
- Sensor de temperatura TMP102 (4)
- Fuente de alimentación
- Antena LoRaWAN 868~915MHz SMA (5)
- Regulador de voltaje a 3.3 V MIC5205



Gráfica 6. Esquemático del PCB del nodo seleccionado. [26]

El perfil del funcionamiento del nodo es determinado por el protocolo LoRaWAN, el cual puede definirse dentro de una de las tres clases observadas en la *gráfica 7* y estableciendo como criterio de selección la vida útil para así disminuir costos y tiempo de reemplazo por parte del ganadero, el sistema se enfoca en la clase A.



Gráfica 7. Clases del perfil de funcionamiento. Adaptado de [39]

La fuente de alimentación está compuesta por dos baterías recargables y un regulador. Las baterías tienen una capacidad de 4.500 mAh y un voltaje nominal de 3,7 V y tienen un tamaño de 18 mm de diámetro y longitud de 65 mm. Estas baterías tienen una duración de carga de 68 días con notificaciones cada 5 minutos [40]. Las baterías recargables tienen una vida útil aproximada de 3 a 4 años, cada batería dura 6 horas para recuperar su carga completa.

### 5.2.2 Elaboración del case

En primer lugar, se desarrolló el dispositivo, este hace referencia a la estructura que será adherida al bovino y en donde estarán internamente los componentes electrónicos de la alternativa seleccionada previamente. Para el diseño del case se tienen en cuenta diferentes factores:

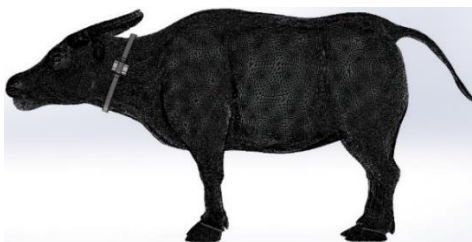
#### A. Alternativas de adhesión del dispositivo al bovino.

Como primera consideración a tener en cuenta es que el dispositivo no puede estar adherido internamente en el animal, es decir, no puede ser inyectado o implantado intramuscularmente porque puede afectar la salud del animal, por esta razón debe estar adherido externamente al mismo [41]. Siguiendo con esa premisa, es necesario que el dispositivo este ubicado de manera adecuada en el cuerpo del bovino con el fin de que no perjudique el desarrollo de las actividades diarias del animal, dentro de estas actividades se encuentran: alimentarse, caminar y descansar [42]. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se realiza una investigación de diferentes partes del cuerpo donde podría ser ubicado el dispositivo teniendo en cuenta la anatomía del bovino y la posibilidad de una toma adecuada de temperatura superficial en la zona. Como se puede observar en la *tabla 4* se realiza una matriz de comparación para definir la alternativa más adecuada para la adhesión del dispositivo mediante el método AHP, este método permite la implementación de un proceso analítico para la comparación de alternativas por medio de la priorización de criterios ver *Anexo 4* [43].

Tabla 4. Características de sistemas de monitoreo. Autoría Propia.

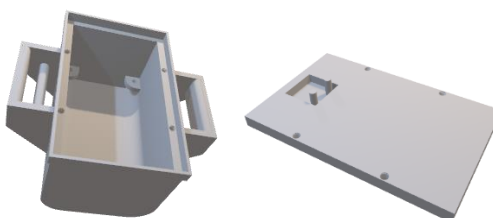
Alternativa	Facilidad de alimentación	Facilidad para descansar	Facilidad para caminar	Bajo riesgo de impacto	Área de la alternativa	Riesgo de la alternativa	Valoración
Cabeza	0,33	0,28	0,35	0,13	0,16	0,17	0,24
<b>Cuello</b>	<b>0,17</b>	<b>0,47</b>	<b>0,35</b>	<b>0,38</b>	<b>0,28</b>	<b>0,33</b>	<b>0,33</b>
Dorso	0,17	0,16	0,19	0,38	0,47	0,33	0,28
Patas	0,33	0,10	0,11	0,13	0,10	0,17	0,15





Gráfica 9. Modelo final del dispositivo adherido al bovino. Autoría propia.

El modelo se compone por dos partes ensambladas: la parte principal, donde se disponen dentro todas las partes electrónicas y la tapa inferior, la cual está en contacto directo con el bovino y es donde debe ir el sensor de temperatura para realizar una medición adecuada de los datos. Los planos del modelo final se encuentran en el *Anexo 5*.



Gráfica 10. Partes del modelo final. Autoría Propia

### C. Etapa de fabricación

Una vez definido el modelo definitivo del case y los planos en el software de SolidWorks, se define la impresión 3D como primera alternativa de fabricación por la facilidad y alcance, para esto fue necesario identificar características técnicas de las impresoras que se encuentran en la Pontificia Universidad Javeriana y verificar si sus capacidades técnicas se ajustan a los requerimientos del diseño planteado. También es necesario identificar el material de impresión que se adecue a las condiciones especificadas anteriormente.

Se realizó una investigación de posibles filamentos a utilizar, encontrando dos alternativas diferentes, los filamentos PLA o los filamentos ABS. Se realizó una matriz de comparación de estos materiales para su posterior selección con las especificaciones por cada criterio ver *Anexo 6*.

Tabla 5. Matriz de comparación material de impresión 3D. Autoría Propia.

Alternativa	Resistencia a térmica	Durabilidad	Biodegradable	Peso	Acabado piezas	Velocidad impresión	Precio	Valoración
ABS	0,75	0,67	0,25	0,67	0,50	0,50	0,67	0,57
PLA	0,25	0,33	0,75	0,33	0,50	0,50	0,33	0,43

Una vez seleccionado el material de impresión se verificó la disponibilidad de este en la Pontificia Universidad Javeriana. El material de impresión definitivo fue el material ABS M30 [44], compatible con las impresoras dentro de la universidad. Se seleccionaron dos impresoras para el proceso de impresión 3D de acuerdo con las capacidades técnicas. La primera impresora seleccionada es la FUSED FORM FF-STD [45] que pertenece al departamento de Ingeniería Industrial. Esta primera selección tiene como finalidad realizar pruebas de diseño para identificar errores y poder ajustar el diseño para la impresión final.

La segunda impresora seleccionada es la FORTUS 380 MC [46] que pertenece al departamento de Ingeniería Industrial. Esta fue la impresora seleccionada para realizar la versión final del dispositivo teniendo en cuenta sus características técnicas, acabado y precisión.

### 5.2.3 Dispositivo Final

Para la elaboración final del dispositivo se utilizó la impresora FORTUS 380 MC con el material ABS M30. También se utilizaron tornillos de referencia M3 x 0,50 mm para el ensamblaje de la tapa inferior y la parte principal y una pasta térmica de referencia Arctic MX-4, para ser aplicada en la abertura de contacto entre el sensor y la piel del bovino. Esta pasta térmica está compuesta de micropartículas de carbono que proporcionan una gran conductividad térmica, esto permite que la temperatura se mantenga estable con una disipación uniforme y eficaz. Además, no tiene propiedades de conducción eléctrica, lo que evita que se generen daños en el sensor por este tipo de eventos. La impresión final del dispositivo se puede observar en la *gráfica 11*.



Gráfica 11. Ensamblaje final del dispositivo. Autoría propia.

## 5.3 Especificación de las herramientas de la capa de acceso del sistema

Las herramientas de recepción de datos o capa de acceso del sistema de monitoreo se componen por la Gateway y la aplicación de programación Node-RED. Se utilizó la siguiente metodología:

### 5.3.1 Selección del Gateway

Para la selección del Gateway se realizó la búsqueda y selección entre diferentes alternativas que contaran con características adaptables a las necesidades requeridas. A partir de esto se realizó una matriz de comparación mediante el método AHP, donde se puntuaron factores relacionados con características técnicas como lo fueron las conexiones y accesos, modulación y protocolos, frecuencia y costo. A su vez, se realizó un cuadro comparativo en el cual se recopilaban más atributos de interés incluyendo los físicos. *ver Anexo 7*.

Tabla 6. Matriz de comparación Gateways. Autoría propia.

Gateways Referencia	Conexiones y Accesos	Modulación y Protocolos	Frecuencia	Costo	Valoración
Dragino - Módulo Gateway LoRaWAN un canal LG01-N+EC25-AU 915/920 MHZ	0,33	0,29	0,20	0,26	0,26
<b>Multi-Tech Systems Inc.-MTCDDT-247A-915-US-EU-GB</b>	<b>0,20</b>	<b>0,29</b>	<b>0,20</b>	<b>0,45</b>	<b>0,28</b>
Four-Faith -LoRaWAN serie F8936-L	0,14	0,29	0,20	0,14	0,21
Dragino - LG308 Indoor LoRaWAN Gateway	0,33	0,14	0,40	0,14	0,25



Gráfica 12. Gateway Multitech. Autoría propia

El Gateway seleccionado corresponde al Multi-Tech Systems Inc de la referencia MTCDDT-247A-915-US-EU-GB, el cual permite la conexión de la red inalámbrica LoRaWAN a una red IP a través de Wifi, Ethernet o celular 3G/4G. Este Gateway tiene a su vez preinstalada la aplicación Nod-RED que, en este

sistema, se utiliza para la programación de flujos a través de bloques, permitiendo que la tecnología LoRaWAN capture los datos de temperatura y ubicación que son emitidos por los nodos. Se configuró un bloque para LoRaWAN continuo a la función mensaje, en la cual se modifica la información. Después, esta información es visualizada de tres maneras:

- ✓ Correo electrónico.
- ✓ Visualización en la interfaz Node-RED - msg.payload.
- ✓ Salida a MQTT.

Dentro de la interfaz de Node-RED, se realizó el fragmento de código en lenguaje JSON que permite personalizar el mensaje enviado por los diferentes caminos. Este código puede consultarse en el *Anexo 8*.

## 6. DESARROLLAR LA CAPA INTERMEDIA QUE PERMITA LA COMUNICACIÓN Y ADMINISTRACIÓN DE DATOS DEL SISTEMA DE MONITOREO

### 6.1 Almacenamiento de datos

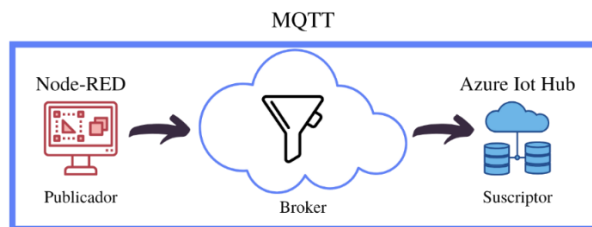
En primer lugar, se realizó una investigación de diferentes bases de datos. Estas bases están escritas en un lenguaje tipo SQL, el cual permite construir bases de datos relacionales y estructuradas. Estas bases están formadas por filas y columnas, donde cada nueva fila corresponde a un nuevo registro y cada columna corresponde a un campo definido. Dentro del análisis realizado se definieron diferentes criterios de selección, dentro los cuales se encontraban: costo, capacidad, sistemas operativos, lenguajes de programación admitidos y sistema administrador. Esta comparación se puede observar en el *Anexo 9*.

Tabla 7. Matriz de comparación bases de datos. Autoría propia.

Bases de Datos	Costo	Capacidad	Sistemas Operativos y Lenguajes Programación	Sistema Administrador	Valoración
Oracle Database	0,11	0,38	0,27	0,39	0,26
<b>Azure SQL Database</b>	<b>0,11</b>	<b>0,38</b>	<b>0,46</b>	<b>0,39</b>	<b>0,29</b>
MySQL	0,54	0,09	0,09	0,08	0,26
Google Cloud	0,25	0,14	0,18	0,14	0,19

De acuerdo con los resultados en la matriz de comparación realizada mediante el método AHP, se seleccionó Azure SQL Database como la base de datos definitiva para el sistema de monitoreo. Para realizar la conexión desde Node-RED a Azure se realizan los siguientes pasos:

1. *Creación del servidor SQL en Microsoft:* se debe crear un servidor donde estará almacenada la base de datos. Este servidor se encuentra en la Suite de Azure IoT Hub y permite conectarse a él mediante la siguiente dirección **tcp: sqlceaiotserver.database.windows.net,1433**, esta dirección es única para el sistema de monitoreo. Después de establecer el servidor, se creó la base de datos SQL, que se adecuara a las especificaciones del sistema. Esta base debe tener una capacidad de almacenamiento suficiente para los registros históricos de los datos. La base de datos creada se llama **TESISISABELLA**.
2. *Asignación de credenciales:* una vez ya configurado el servidor y la base de datos, se deben establecer credenciales que permiten el acceso a la consulta y visualización de los datos dentro de la base de datos. Además, estas credenciales son necesarias para realizar la conexión desde Node-RED hasta la base de datos y posteriormente a Power BI.
3. *Conexión desde Node-RED al Servidor:* para realizar esta conexión se utiliza el protocolo MQTT. Este protocolo está basado en la comunicación M2M (machine to machine) que permite realizar una conexión inalámbrica directa entre el Gateway y Azure IoT Hub. Este protocolo utiliza un patrón tipo publicador/suscriptor y un servidor central denominado bróker, donde se filtran todos los mensajes entrantes. Para esto, se debe crear como usuario al Gateway y se le debe dar permisos de acceso para enviar datos a la base. Estos permisos son concedidos mediante un SAS token con validez de dos años. Este proceso se puede observar en la *gráfica 13*.



Gráfica 13. Funcionamiento del Protocolo MQTT. Autoría Propia.

4. *Configuración base de datos:* Después de establecer la conexión entre el Gateway y Azure, se debe configurar la entrada de los datos. Estos datos entran como texto a Azure mediante el protocolo MQTT, con la siguiente estructura:

*Fecha:* Sun Oct 10 2021 20:54:15 GMT-0500

*Datos:* 4.6491,-74.0867T21.499

*Referencia nodo:* 00-04-a3-0b-00-20-cf-fe

*Potencia:* -70

Los datos entrantes deben ser almacenados en una tabla de datos estructural configurada según los campos seleccionados. Se crearon seis tablas diferentes dentro de la base de datos para el desarrollo del sistema de monitoreo:

- I. **Ganado\_bovino:** esta tabla almacena todos los datos históricos que envía el dispositivo. Cada nuevo dato entrante se registra como una nueva fila. Esta tabla contiene los siguientes campos: *FechaLlegada*, *FechaMedicion*, *ID*, *Latitud*, *Longitud*, *Potencia*, *ReferenciaNodo*, *Temperatura*.
- II. **Ganado\_bovino\_ultimo\_dato:** esta tabla de datos se usa para almacenar el último dato emitido por el dispositivo. Es decir, cuando un nuevo dato es enviado por Node-RED, este dato reemplaza al registro inmediatamente anterior. En esta tabla solo existe un registro por referencia de nodo, es decir, por dispositivo. Esta tabla contiene los mismos campos que la tabla *ganado\_bovino*, exceptuando el ID.

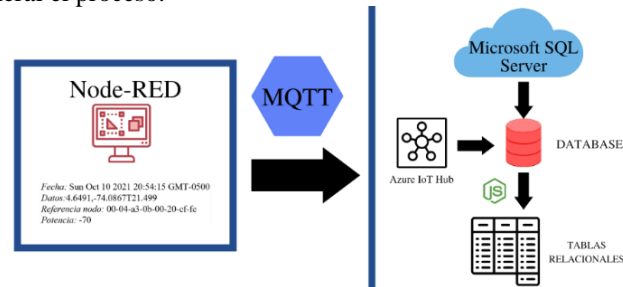
El dato entrante a las dos tablas previamente expuestas se recibe en formato de texto. Por esta razón, es necesario hacer uso de un editor de código fuente, en este caso se utilizó Atom, que permite configurar el código en lenguaje JavaScript y captar cada fragmento del mensaje y situarlo en el campo según corresponda. Dentro de este código se definen las variables, que corresponden a los campos mencionados anteriormente, y su valor es determinado mediante una extracción del fragmento de texto identificando la posición inicial y la posición final de los caracteres. Se debe crear una variable por cada campo en la tabla de datos para que no existan valores vacíos. También se hace uso de otras funciones para capturar la fecha. Este código se puede observar en el *Anexo 10*.

- III. **Ganado\_bovino\_config:** esta tabla permite configurar características específicas para cada ganadero y bovino. Dentro de esta tabla se definen aspectos como: límites de latitud y longitud, límites de temperatura y estado de alertas. La función principal de esta tabla es construir una interfaz completa, en donde el ganadero pueda visualizar datos diferentes a la ubicación y temperatura teniendo en cuenta las especificaciones de su terreno y ganado.
- IV. **Ganado\_bovino\_SMS:** esta tabla permite visualizar las alarmas que se han activado y el mensaje que es enviado mediante SMS. Para esto, se debe configurar el código de alarmas, el cual permite enviar un mensaje al usuario mediante la aplicación de Twilio. Esta tabla permite conocer los datos históricos de alarmas que ha presentado cada dispositivo.
- V. **Dpto\_autoridades:** la finalidad de esta tabla es proporcionar la información de contacto con las autoridades por cada departamento en Colombia. Esto le permite al usuario actuar

de manera rápida y eficaz, en caso de que se presente alguna anomalía en los datos o una situación de riesgo. La tabla presenta los datos de: teléfono, correo y dirección por cada departamento.

**VI. Usuarios:** esta tabla contiene información relacionada con los datos del usuario. Le permite al usuario interactuar con cada bovino que este dentro del sistema. Esta tabla contiene información como: nombre del propietario, nombre de la vaca, referencia del nodo asignado, el propósito del ganado, el género del ganado, departamento, raza del ganado, fecha de nacimiento del bovino, número de teléfono para enviar alertas, entre otros.

La siguiente gráfica agrupa las características y pasos específicos previamente expuestos y permite visualizar de manera general el proceso.



Gráfica 14. Conexión entre la capa intermedia del sistema. Autoría Propia.

## 6.2 Sistema de Alarmas

El sistema de monitoreo diseñado cuenta con un sistema de alarmas integrado, este sistema permite el envío de alarmas al usuario en caso de que se presenten cambios en los datos que pueden significar situaciones de riesgo para el bovino. La función principal del sistema de alarmas es advertir al usuario de acontecimientos relacionados con el bovino para la toma de decisiones rápidas. Para la visualización del diagrama de flujo del sistema de alarmas ver el *Anexo 11*. El sistema de alarmas diseñado se ejecuta de forma consecutiva una vez recibe los datos enviados desde el dispositivo y se activa según los diferentes casos establecidos. El código base del sistema de alarmas se encuentra escrito en lenguaje JavaScript, el cual se puede evidenciar en el *Anexo 12*.

Es importante mencionar que para brindar de forma efectiva un servicio de alarmas es necesario que el cliente cuente con un teléfono móvil con acceso a señal, dado que el mensaje se transmite por medio de SMS. Esta conexión se realiza mediante Twilio, que es una plataforma de desarrollo que permite construir aplicaciones de comunicación en la nube y sistemas web. Al usar las API de Twilio en una aplicación, se le puede agregar la funcionalidad de mensajes de voz, videollamadas, mensajes de texto y más. En este caso, Twilio permite automatizar el envío de los mensajes de texto al cliente, en caso de que una alarma sea activada, por costo de \$180 pesos el mensaje, brindando 300 mensajes de prueba gratis, un código base de trabajo en más de 5 lenguajes de programación y la capacidad de operar las 24 horas del día.

### 6.2.1 Explicación detallada del diagrama

El diagrama de flujo del sistema de alarmas está compuesto por 5 partes principales, las cuales abarcan de forma detallada todos los posibles casos que se pueden dar al momento de activar el estado de alerta. Antes de entrar a profundidad en estas 5 partes principales, es importante mencionar los diferentes caminos o direcciones que se pueden dar en dichos casos, además de los parámetros y variables establecidas.

#### a. Variables establecidas:

- NumAlerts = arreglo que almacena la cantidad de alarmas activadas por bovino.

#### b. Posibles estados de alerta:

1. El bovino se encuentra dentro del estado normal de las condiciones establecidas.

2. El bovino se encuentra fuera de los límites de distancia establecidos o inferior al límite de temperatura y el número de alarmas es igual o inferior a 3.
3. El bovino se encuentra fuera de los límites de distancia establecidos o inferior al límite de temperatura, con un número de alarmas superior 3, pero inferior a 13 alarmas y un tiempo entre alarmas de 30 minutos.
4. El bovino se encuentra fuera de los límites de distancia establecidos o inferior al límite de temperatura, con un número de alarmas superior 3, pero inferior a 13 alarmas y un tiempo entre alarmas diferente de 30 minutos.
5. El bovino se encuentra fuera de los límites de distancia establecidos o inferior al límite de temperatura, con un número de alarmas superior 13.
6. El bovino se encuentra por encima del límite de temperatura establecido con un tiempo entre alarmas igual a 12 horas.
7. El bovino se encuentra por encima del límite de temperatura establecido con un tiempo entre alarmas diferente a 12 horas.
8. El bovino se encuentra dentro de las condiciones normales establecidas, pero se encontraba en estado de alerta por temperatura o distancia.

Teniendo en cuenta los estados mencionados, se puede observar en el diagrama de flujo los siguientes cinco casos principales:

*Tabla 8. Partes principales del sistema de alarma. Autoría propia.*

<b>Parte principal</b>	<b>Descripción</b>	<b>Estados que aplican</b>
Caso 1 (Intervención Inmediata)	Sucede si el NumAlerts < 3 y distancia fuera de límite o temperatura inferior a límite	Estado 2.
Caso 2 (Intervención Prolongada)	Sucede si la temperatura es superior a límite y si han pasado más de 12 horas desde la alerta o es primera alerta.	Estado 6.
Caso 3 (Intervención moderada)	Sucede si el $3 \leq \text{NumAlerts} \leq 13$ y han pasado más de 30 minutos desde la última alerta y la distancia está fuera del límite o la temperatura es inferior a límite.	Estado 3.
Caso 4 (Intervención Nula)	Si la temperatura o distancia se encuentra dentro del estado normal* establecido.	Estado 8.

\*Estado normal hace referencia a los datos de un bovino que se encuentran dentro de los límites de temperatura y distancia establecidos.

\*\*El Caso 5 no envía ningún mensaje, por ende, no se establece dentro de la prestación del servicio al usuario final. Se ejecuta cuando: todos los bovinos han sido evaluados, las alarmas no están dentro de los tiempos de evaluación establecidos o el bovino se encuentre en el estado normal. Dentro de este caso aplican los estados: Estado 1, Estado 4, Estado 5, Estado 7.

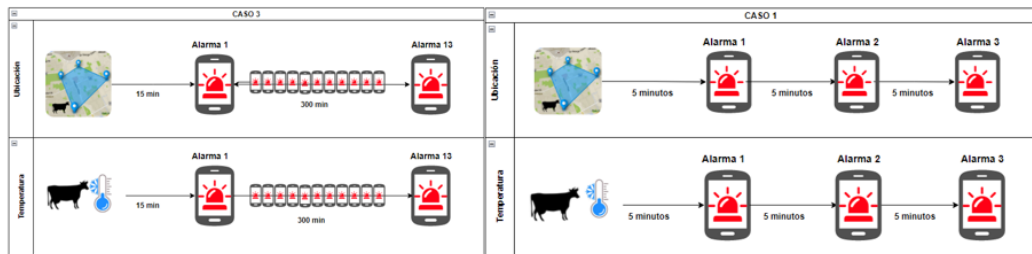
Teniendo en cuenta los estudios base mencionados en [36] y [37], los rangos límite de temperatura se establecieron con base a la temperatura normal superficial del bovino, la cual tiene incrementos de 0,5 °C hasta 3,5 °C, estableciéndose en un rango de 32 °C - 36 °C. Por otra parte, se definió una temperatura de advertencia a partir de los límites, entorno de pruebas y la incertidumbre del instrumento de medición, especificada en el objetivo de evaluación del sistema. Finalmente, la temperatura crítica se fijó para los valores con una variación significativa que representan un riesgo de enfermedad, como se menciona en la *tabla 1*. Según las pruebas realizadas, se debe tener en cuenta que la diferencia de la temperatura superficial con respecto a la temperatura rectal tiene un valor aproximado de 3,1 °C, donde la temperatura promedio superficial del bovino se identificó en 35,4 °C con una desviación de 0,66 °C.

*Tabla 9. Rangos de temperatura establecidos. Autoría propia.*

<b>Límite</b>	<b>Temperatura crítica (°C)</b>	<b>Temperatura de advertencia (°C)</b>	<b>Temperatura normal (°C)</b>
Inferior	0 - 29	30 - 31	32
Superior	39 - 50	37 - 38	36

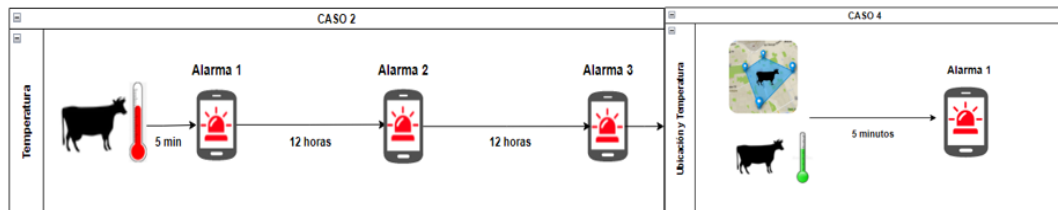
Para el establecimiento de los parámetros referentes a intervalos de tiempo y número de alertas en el sistema de alarmas, tanto para las variables de temperatura y ubicación, se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- **Tres alarmas:** dado que los primeros minutos son los más críticos por el alto riesgo de pérdida, robo del bovino o por posible riesgo de muerte por disminución de temperatura, síntoma que no es común por enfermedad, se establece generar un estado de alerta de alto impacto, generando un total de 3 alarmas consecutivas en el primer intervalo de tiempo. Con esto, se pretende lograr un rápido aviso y acción efectiva ante cualquier anomalía.
- **Trece alarmas:** luego del primer intervalo de tiempo y ante las 3 alarmas no atendidas, se establece que el estado de alerta continuo debe permanecer, ya sea por distancia fuera del límite o temperatura inferior al límite. Sin embargo, se prolonga el tiempo de envío de alertas a 30 minutos, con el fin de no saturar de SMS al ganadero ante otra posible eventualidad ocurrida o, aunque la alerta fuese atendida en este periodo de tiempo, la ubicación y/o temperatura no se encuentra en su estado normal. Este estado de alarma permanecerá durante aproximadamente 5 horas luego del primer intervalo de tiempo, establecido como tiempo límite en el cual el ganadero ha recibido la alerta y disminuye la probabilidad de obtener una respuesta efectiva.



Gráfica 15. Descripción caso 1 del sistema de alarmas. Autoría propia.

- **Lapso superior a 12 horas:** luego de recibir la primera alarma por aumento de temperatura, se esperará un lapso de 12 horas para volver a enviar la siguiente alarma. Este lapso de tiempo es establecido, debido a que el aumento de la temperatura en el bovino no suele ser mortal cuando es causado por enfermedades que se prolongan por varios días, a pesar de que el bovino se encuentra con un suministro de medicamentos. Dentro de las enfermedades más severas que pueden afectar a los bovinos, se encuentra la diarrea viral bovina, la cual puede causar la muerte en un periodo de aproximadamente 48 horas. Por tal razón la generación de alarmas cada 12 horas, permitirá el aviso inmediato y control de la salud del animal, para la oportuna intervención. A su vez, se evita que el ganadero reciba alarmas innecesarias que no generarán datos de valor.
- **Estado normal:** alarma que le permite al ganadero conocer cuando los valores se encuentran en un estado normal luego de haberse activado algún caso de alarma anteriormente.



Gráfica 16. Descripción del caso 2 sistema de alarmas. Autoría propia.

### 6.2.2 Explicación método de delimitación distancias

Como se mencionó anteriormente, el sistema de alarmas entra en estado de alerta cuando el valor de ubicación se encuentra fuera de los límites establecidos. Para calcular la distancia desde el punto de referencia hasta la ubicación del bovino, se usó la fórmula de Haversine [47], expuesta en la ecuación 1.

$$Distancia = 2 * R * asin \sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta lat}{2}\right) + \cos(Lat1) * \cos(Lat2) * \sin^2\left(\frac{\Delta lon}{2}\right)}$$

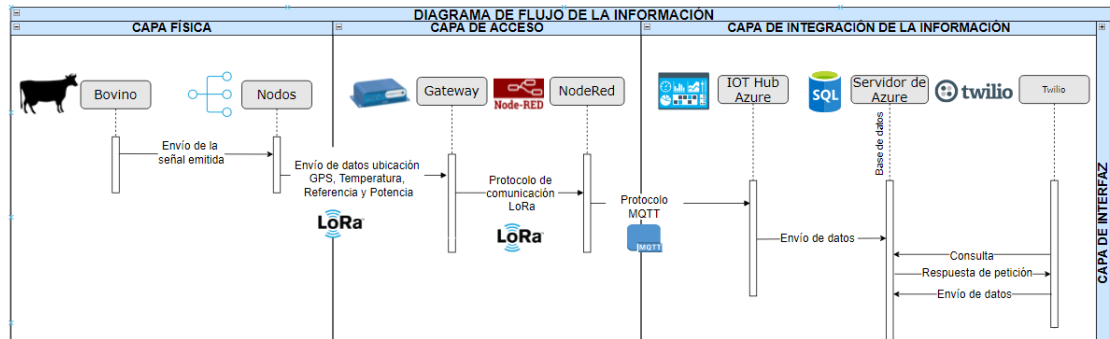
Lat → Latitud  
 Lon → Longitud  
 (Lat1 \*, Lon1 \*) → Latitud longitud en el punto 1  
 (Lat2 \*, Lon2 \*) → Latitud longitud en el punto 2  
 $\Delta lat = lat2 - lat1$   
 $\Delta lon = lon2 - lon1$   
 R = 6.572,795477598 Km (Radio de la tierra)

Ecuación 1. Formula de Harvesine

\*Lat1 y Lon1 es el centro establecido por el dueño de la finca, mientras que Lat2 y Lon2 hace referencia a las coordenadas emitidas por el dispositivo cada 5 minutos.

Al analizar la ecuación, se puede observar que no afecta la dirección del punto de latitud y longitud, porque al elevarse la ecuación al cuadrado se convierte la distancia en valor absoluto y su funcionamiento pasa a ser al estilo radar, en la cual lo importante es que la distancia no sea mayor a la establecida por los límites del predio.

A continuación, el diagrama de flujo de información, integrando las primeras tres capas del sistema: capa física, de acceso y de integración de la información, donde se observa la base de datos, los servidores generados para el sistema y la interacción con la aplicación Twilio.



Gráfica 17. Diagrama de flujo de información. Autoría propia.

## 7. DESARROLLAR LA INTERFAZ PARA EL USUARIO DEL SISTEMA DE MONITOREO, BASADO EN LAS NECESIDADES DEL GANADERO

### 7.1 Investigación de mercados

Para el desarrollo de la interfaz del usuario, la cual permite la visualización de los datos suministrados por el sistema de monitoreo, se procedió a realizar una investigación del mercado para conocer las necesidades y preferencias del ganadero con respecto a la interfaz del sistema. Para esto, se establecieron tres hipótesis iniciales, relacionando características y preferencias del ganadero, las cuales se comprobaron a partir de análisis, con el objetivo de conocer el mercado al cual va dirigido el sistema al momento de utilizar una interfaz. El alcance se definió a partir de un tamaño de muestra que se calculó con la herramienta Netquest [48] estableciendo una confianza del 95% y un margen de error del 7%, para una muestra total de 196 ganaderos a nivel de las regiones principales del sector. Para la realización del método se implementó una encuesta anónima realizada en Microsoft Forms compuesta por 20 preguntas cerradas, usando el método de embudo, pasando de lo general a lo específico. La encuesta se compuso por cuatro bloques:

1. Información general: se realizó una caracterización del usuario, ganado y ubicación.
2. Interés por el sistema: se presentó el sistema diseñado al usuario.
3. Preferencias de la interfaz: datos relacionados con diseño y estructura de la interfaz.
4. Económico y abigeato: inversión económica y pérdidas ocasionada por abigeato.

La recolección de la información se realizó principalmente en la feria de AGROEXPO, que tiene como enfoque el sector agroindustrial. Aquí se contactaron ganaderos de las principales regiones del país para la exposición y compra de reses. A su vez, se realizaron encuestas con personas del sector, por medio del contacto directo en puntos de concentración como convenciones, veterinarias, mangas de coleo y frigoríficos. El procesamiento de la información se realizó inicialmente por medio de Excel, en donde se hizo una depuración y estructuración de los datos iniciales, para su posterior análisis en el programa SPSS, en donde se introdujeron las hipótesis y se realizaron pruebas de los datos como comparación de medias con T-Student.

De acuerdo con la información recolectada en las encuestas, se obtiene una representación proporcional del mercado objetivo, en donde sus características demográficas reúnen su ubicación en las regiones: *Andina, Orinoquia y Caribe* y el propósito del ganado es principalmente *doble propósito y ceba*. Además, se obtiene que un 44,4% de la población objetivo cuenta con internet, lo que permite realizar una segmentación más específica y pronosticar la demanda. Los resultados completos se encuentran en el *Anexo 13*.

En cuanto a la protección del ganado, existe un 49,5% de ganaderos que no tienen actualmente algún método de monitoreo. Dentro de los métodos de vigilancia más usados actualmente se encuentran: *cercado y personal encargado*. A pesar de esta información, se obtuvo un alto porcentaje de interés por el sistema de monitoreo siendo este de 93,9%, del cual el 58,2% lo clasificó como *muy interesante*. Finalmente, para complementar el interés, el 75% de los ganaderos evaluó la utilidad del sistema de alarmas con un puntaje superior a 4 en una escala de 1 al 5. Con base en la información relacionada con la interfaz, las preferencias en visualización se agrupan en *página web y app móvil* con un resultado del 53,6% y 44,4% respectivamente. Dentro de las características de la interfaz, que obtuvieron mayor porcentaje de calificación de importancia, se encuentra: la claridad en la información e información de contacto, y de los atributos relacionados con la visualización de datos lideran: la *información rápida de contacto y la generación de alarmas*. Concluyendo que, dentro de la interfaz el ganadero encuentra útil la información clara, concisa y de ayuda con el apoyo del sistema de alarmas.

Con el apoyo de la herramienta de análisis estadístico SPSS, se obtiene la comprobación de tres hipótesis que relacionan las variables recolectadas. En primera instancia, se realiza la comparación de medias de la cantidad de hectáreas que posee un ganadero que ha sufrido abigeato con uno que no, obteniendo con una significancia del 5%, que es mayor la media de hectáreas para el ganadero que ha sido víctima del abigeato. Por ende, se concluye que el riesgo de abigeato aumenta dependiendo de la extensión del predio. Por último, se realizó una comparación de medias de la puntuación del atributo *mapa del sitio* en la interfaz, obteniendo con una significancia del 5%, que los ganaderos con más de 51 bovinos, al igual que los *muy interesados* en el sistema, puntúan en promedio el atributo superior a la media. Debido a esto, se concluyó que dentro de la interfaz el ganadero potencial califica como *muy importante* la interacción con el mapa del predio.

## 7.2 Conexión de la base de datos y la Interfaz del Usuario

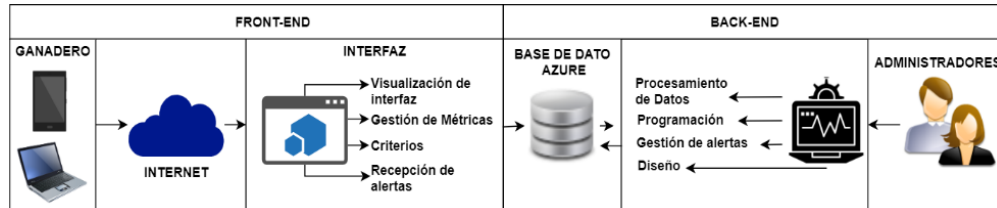
Para establecer la conexión entre Azure SQL Database y la interfaz de usuario se realizó una investigación sobre las aplicaciones que permiten el desarrollo de interfaces y la compatibilidad e interoperabilidad de estas con la base de datos seleccionada. Para esto, se construyó la matriz de comparación mediante el método AHP, donde cada aplicación fue evaluada con diferentes aspectos técnicos y operativos, *ver Anexo 14*.

Tabla 10. Matriz de comparación interfaz. Autoría propia

Alternativa	Precio	Versión	Aplicación Móvil	Aplicación Web	Conexión Azure	Actualización en tiempo real	Complejidad de programación	Valoración
Power Bi	0,56	0,25	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,37
Tableau	0,12	0,50	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,30
Rapid Miner	0,32	0,25	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32

Según la matriz, se estableció que Power BI es la aplicación más adecuada para el desarrollo de la interfaz. Power BI es una herramienta que permite el análisis y la visualización de datos en diferentes tipos de informes para el usuario final desarrollada por Microsoft [49]. Una vez establecida la conexión entre

Node-RED y la base de datos de Azure SQL Database, se realizó la conexión con Power BI. Esta conexión se hace mediante DirectQuery, esta forma de conexión permite que los datos sean enviados directamente a Power BI, por ende, cada vez que se realiza una consulta en la interfaz, los datos estarán actualizados desde la base de datos. Para realizar este tipo de conexión se necesitan: el servidor de la base de datos, la base de datos y las credenciales de acceso. Una vez realizada la conexión se deben seleccionar las tablas a importar para el análisis y visualización de los datos en la interfaz. Para mejor entendimiento, se realiza el diagrama front-end/back-end, *ver gráfica 20*, que permite identificar la relación entre la interacción directa del cliente en la interfaz y la administración, gestión y procesamiento de datos del sistema.



Gráfica 18. Diagrama front-end y back-end de la Interfaz. Autoría propia.

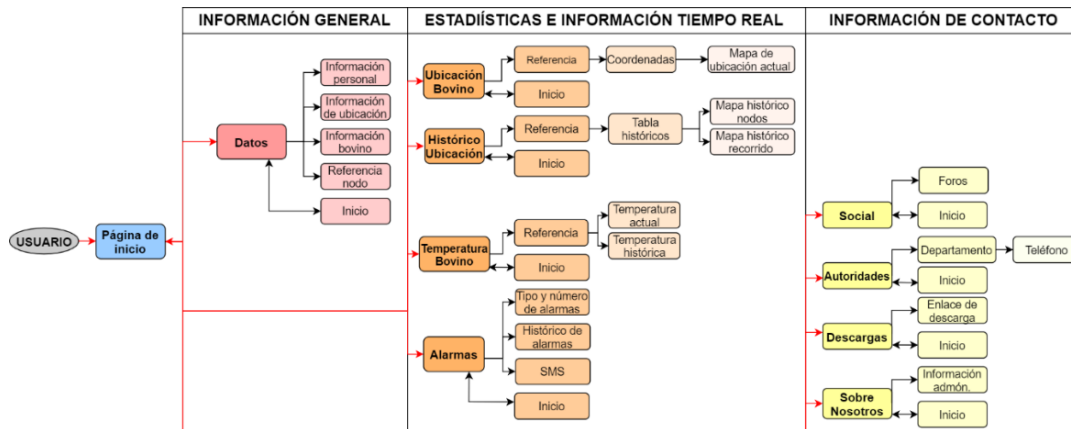
### 7.3 Desarrollo de la interfaz del usuario

En primer lugar y teniendo en cuenta los resultados de la investigación de mercados, se establecen diferentes páginas para que el usuario pueda navegar por toda la interfaz, cada una de estas páginas cumple una función diferente teniendo en cuenta los datos relacionados. Además, la interfaz incluye diferentes objetos visuales que son paquetes que contienen código y permiten graficar los valores que le son asignados. Para el desarrollo de la interfaz se usaron diferentes objetos visuales predeterminados en Power BI, como lo son: mapas, tacómetros, botones, etiquetas, tablas y listas desplegadas. Dentro de los aspectos más importantes en la interfaz, se determinan las siguientes secciones, *ver gráfica 21*, que deben ser incluidas para una adecuada visualización y organización de los datos.

**Información general:** contiene toda la información relacionada con el usuario, es decir, sus datos personales: nombre, número telefónico, correo electrónico, departamento y región; la información relacionada de cada bovino como: nombre del bovino, sexo, propósito, fecha de nacimiento, raza y la referencia de nodo relacionada con cada dispositivo, esto con el objetivo de poder llevar un seguimiento a cada bovino dentro del sistema.

**Estadísticas e información en tiempo real:** contiene la información más relevante de todo el sistema, en esta sección se encuentran: la ubicación actual del bovino, para la cual se usa un mapa que permite configurar las coordenadas de latitud y longitud, para así precisar el último punto de ubicación recibido por el sistema; la información histórica, en la cual se encuentran todos los datos de ubicación y permite visualizar el recorrido del bovino dentro de la zona; la temperatura del bovino, dato que está graficado mediante un tacómetro, para identificar el rango de temperatura del último dato y una gráfica que representa el comportamiento histórico de la temperatura de cada bovino; alarmas del sistema, en donde se puede visualizar, mediante una tabla, el histórico de las alarmas que han sido activadas.

**Información de contacto:** contiene información relevante para los usuarios, en esta sección se encuentran: información sobre plataformas y foros ganaderos; información de contacto con las autoridades departamentales como teléfonos, direcciones y correos; la visualización general de los datos históricos y la opción de descargarlos; información relacionada con la administración de todo el sistema.



Gráfica 19. Secciones e información contenida en la interfaz del usuario. Autoría propia.

## 8. EVALUAR FUNCIONALMENTE EL SISTEMA DE MONITOREO MEDIANTE PRUEBAS Y ANÁLISIS

Para la evaluación del funcionamiento del sistema de monitoreo, se realizó una división en tres partes fundamentales: transferencia de datos, sistema de alarmas e interfaz del usuario. En cada una de las partes se realizaron pruebas específicas, con el objetivo de identificar desviaciones, nivel de error de los datos y la eficiencia del funcionamiento.

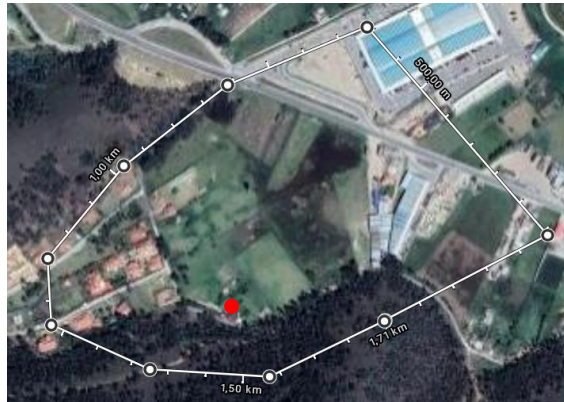
### 8.1 Evaluación de la transferencia de datos

La evaluación de la transferencia de datos se realizó de forma individual para las variables de ubicación y temperatura, donde se hicieron pruebas de alcance y calibración respecto a una medida de referencia. Para ambos casos las pruebas fueron realizadas en el ambiente real donde estaba en funcionamiento el sistema, recolectando datos cada vez que un dato es enviado.

#### 8.1.1 Alcance del sistema de monitoreo

Para calcular el alcance del sistema, fue necesario monitorear la variable de potencia medida en dBm. El dispositivo seleccionado transfiere los datos de manera adecuada en un rango de -30 a -115 dBm, este rango permite que los datos enviados por el dispositivo sean decodificados de manera correcta para evitar desviaciones significativas en los valores de latitud, longitud y temperatura del bovino. El alcance del sistema depende de la ubicación y altura del Gateway. La ubicación del Gateway es el punto de referencia para el centro del radar, que corresponde al área de alcance y la altura permite ampliar esta área, es decir, entre más altura, mayor el alcance.

En este caso, el Gateway se ubicó a una altura de 4 metros. Una vez posicionado el Gateway, se tomaron diferentes datos variando la distancia del dispositivo al Gateway y teniendo en cuenta el valor de potencia en cada toma. Según los resultados obtenidos, la distancia de alcance es de 449,18 metros con un valor promedio de potencia de -110 dBm. Sin embargo, el sistema recibe datos hasta una potencia aproximada de -125 dBm, con un alcance máximo que corresponde a 526,70 metros, aunque la confiabilidad de la decodificación disminuye. En la *gráfica 22* se puede observar el área de alcance del sistema, donde el Gateway fue ubicado en el punto de color rojo, esta área tiene una superficie de 189778,83 m<sup>2</sup>, lo que corresponde a 18,98 hectáreas.



Gráfica 20. Área de alcance del sistema. Autoría propia.

Es importante resaltar que, el alcance del área se ve afectado por diferentes factores que interfieren en la comunicación como: edificaciones, arboles, montañas y antenas de comunicación, todas presentes en el terreno de pruebas.

### 8.1.2 Calibración de la ubicación y temperatura

Para la calibración del sensor GPS Quectel L80, se realizaron 2 tomas de datos en diferentes ubicaciones, con el objetivo de determinar el error de las coordenadas que suministraba el sensor GPS, con respecto a la ubicación patrón del dispositivo y la variación en la precisión del sensor GPS, que podía verse influenciada por el entorno del sistema. Para la realización de la prueba, se utilizó como instrumento de referencia la aplicación Google Maps, que emplea satélites para determinar las coordenadas con una tolerancia máxima de 20 metros y se ve afectada por la ubicación de edificios o lugares subterráneos [50]. La primera calibración se realizó en zona urbana, donde el dispositivo se ubicó en un punto fijo hasta realizar la toma de 30 coordenadas cada 5 minutos, tanto por el sensor GPS del dispositivo, como por la aplicación móvil, en el mismo lugar donde se encontraba el nodo. La segunda calibración se realizó de forma similar, con la modificación de la ubicación del sensor GPS en zona rural, a fin de examinar la variación de la potencia, promedio de tiempo de envío y error medio.

Tabla 11. Resultado de pruebas de calibración. Autoría propia

	Zona urbana	Zona rural
Potencia (dBm)	-59,57	-58,57
Promedio intervalo de tiempo para envío de datos (min)	4,22	4,14
Error medio (m)	12,41	12,26

En la *tabla 11* se pueden observar los resultados en los que se evidencia relación proporcional entre la potencia y el error medio. Por lo que se procede a analizar la correlación entre la potencia y el error en la toma de muestras, obteniendo una  $\rho$  de Spearman de 0,327, por lo que se corrobora dependencia del error con respecto a la potencia, ver *anexo 15*. Esta variable se ve afectada por factores del entorno, como se pudo evidenciar en la comparación entre la zona rural y urbana, desde diferentes distancias y altura del Gateway. Además de esta relación, se obtiene un error de nivel aceptable de  $\pm 12,26$ m, que se encuentra dentro del intervalo de precisión del objeto de referencia utilizado para comparación ( $\pm 20$ m) y con una precisión del módulo GPS de  $\pm 2,5$  m CEP (Circular Error Probability) [51]. Para la calibración del sensor de temperatura se realizó una prueba durante dos momentos del día: tarde-noche y mañana, esto con el objetivo de determinar la variación de la temperatura ambiente a través del día y los efectos sobre la temperatura superficial en el ganado. El instrumento de referencia fue un termómetro digital infrarrojo de la marca Dikang modelo HG01, de escala Celsius e intervalo de recepción de datos entre los 30°C- 43°C. La forma de empleo del termómetro facilitó la toma de datos en el cuello del bovino, misma ubicación en el que el sensor de temperatura está en contacto el bovino. La toma de los datos se realizó al aire libre del terreno tomando 30 datos, y como resultado se obtiene

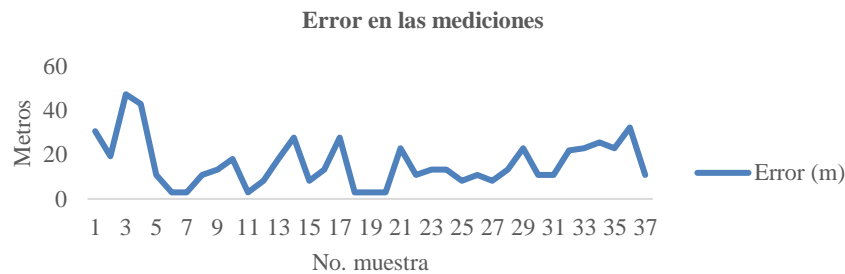
un error medio de 2,14 °C, estando dentro del intervalo de incertidumbre los componentes utilizados para la toma de datos.

### 8.1.3 Pruebas en el bovino

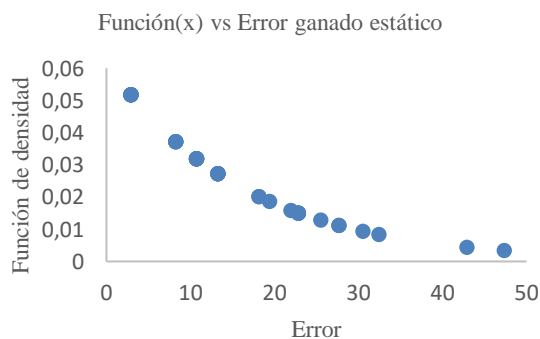
Para la tercera prueba de aplicación, se tomaron datos en el bovino en dos escenarios, uno en reposo y otro en movimiento. A partir de los resultados se puede observar un comportamiento del error exponencial en ambos casos, cada uno con su respectivo error medio. Los principales factores influyentes en el resultado son la potencia y el movimiento del ternero, debido a que la potencia tiene una relación directamente proporcional con la velocidad de envío de datos y el desfase se ve evidenciado si el bovino se mantiene en movimiento. Los resultados, tendencias y tiempo de estabilización se encuentran en el *anexo 16*.

Tabla 12. Resultados pruebas reales. Autoría propia.

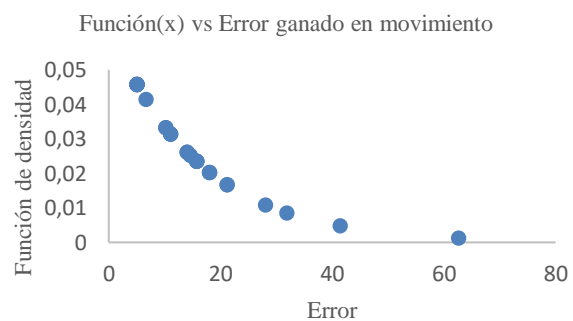
	Bovino estático	Bovino en movimiento
Error medio (m)	16,10	15,93
Promedio intervalo de tiempo para envío de datos (min)	4,29	4,67
Potencia (dBm)	-79,72	-85,62



Gráfica 21. Error en la toma de datos. Autoría propia



Gráfica 23. Función de densidad del error ganado estático. Autoría propia



Gráfica 22. Función de densidad del error ganado en movimiento. Autoría propia

El comportamiento exponencial del error en los datos del ganado en reposo se puede evidenciar en la *gráfica 26* con distribución de lambda de 62,10. Ambos resultados se comportan exponencialmente basados en las pruebas K-S, y sus gráficas se encuentran en el *Anexo 15* y *16*. Se puede concluir, que los escenarios de movimiento del bovino presentan variaciones mínimas en: la precisión, siendo de 0,16 metros; el tiempo promedio de transferencia de datos de 0,38 minutos.

### 8.1.4 Pruebas del sistema de alarmas

Para la evaluación del sistema de alarmas, se realizaron pruebas que permitieran la verificación por cada tipo de caso para calcular la efectividad del sistema completo.

**Caso 1:** la aplicación se realizó únicamente con los datos de temperatura del bovino. Para esto, se modificó el valor del límite inferior, con el objetivo de evaluar los valores de temperatura corporal superficial inferiores a 39 °C, durante las tres primeras alarmas enviadas por el sistema al activarse este caso. Se realizaron 40 pruebas, en la cuales se obtuvo una efectividad del 95% para el sistema.

**Caso 2:** en la aplicación de las pruebas del caso 2 en el que el bovino supera la temperatura límite, indicio de enfermedad, se ha modificado dicho límite de tal forma que se pueda mantener el sistema con una temperatura superior a 29°C durante 12 horas consecutivas, dicha prueba se realizó 10 veces dando como resultado un porcentaje de efectividad de 100%.

**Caso 3:** la aplicación se realizó para las variables de temperatura y distancia fuera de los límites establecidos después de las tres primeras alarmas del caso 1. Esta prueba se realizó 20 veces y se obtuvo una efectividad del 100%.

**Caso 4:** este caso se evalúa implícitamente en cada uno de los anteriores casos, corroborando que no se reciba ninguna alarma cuando el sistema no se encuentra en estado de alarma. Esta prueba se realizó un total de 40 veces, dando como resultado una efectividad del 100%.

Una vez obtenidos los valores de efectividad para cada caso, se realiza la *ecuación 2* que permite calcular la Efectividad del Sistema de alarmas Integrado (*ESI*):

$$ESI = E1 * E2 * E3 * E4$$

$$ESI = 95\% * 100\% * 100\% * 100\%$$

$$ESI = 95\%$$

*Ecuación 2. Efectividad del sistema de alarmas integrado.*

## 9. DETERMINAR EL COSTO-BENEFICIO ESPERADO DEL SISTEMA DE MONITOREO PARA EL GANADERO.

### 9.1 Análisis de costos de los componentes

El análisis de costos para el sistema de monitoreo se inició con una entrevista a profundidad con el jefe de Planeación y Estudios Económicos de FEDEGAN, con el fin de recolectar información a mayor detalle del mercado objetivo y comprender tendencias e intereses que han tenido los ganaderos en sistemas de monitoreo similares para los bovinos durante años anteriores. Una de las grandes conclusiones obtenidas fue que, a pesar de la creciente necesidad de controlar el problema del abigeato, un gran obstáculo para la implementación son los elevados costos en los que se incurrieron y la falta de rentabilidad que generarían para su economía. A su vez, una de las alternativas más llamativas para el sector, sería la obtención de paquetes o kits por medio de corporaciones que realizan alianzas con los productores o distribuidores y que podrían generar reducciones en el precio final en comparación de la obtención individual de los dispositivos.

A partir de lo anterior, y con los resultados obtenidos en las encuestas, se hizo la identificación de los costos fijos y variables que componen todo el sistema, entre los cuales se incluyen: costos productivos y operativos. Dentro de los costos fijos se establecieron los elementos del sistema que no dependen del número de dispositivos producidos o plataformas en funcionamiento, sin embargo, para la estimación del costo no se tuvieron en cuenta: la conexión a internet, el computador, teléfono móvil, baterías y cargadores de baterías, ya que se espera que el ganadero cuente previamente con estos. Para más información *ver Anexo 17*.

*Tabla 13. Costos fijos. Autoría propia.*

Costos Fijos	Precio (\$ COP)
Licencia Azure	\$ 45.000 /mes
Twilio	\$ 40.000/mes
Licencia Power BI	\$ 37.600/mes
Gateway	\$ 660.720
Cable	\$ 80.000
Infraestructura física	\$ 300.000

Para los costos variables se identificaron los elementos y componentes que cambian según la cantidad producida de dispositivos o plataformas en funcionamiento. Dentro del costo *desarrollo y soporte* se tiene en cuenta la etapa de investigación y producción del dispositivo.

Tabla 14. Costos variables. Autoría propia

Costos Variables	Unidad de medida	Precio Unitario (\$ COP)
Dispositivo Base protocolo LoRaWAN	Unid	\$ 105.000
Correa de Sujeción	Metros	\$ 9.000
Material Caja case	Gramos	\$ 80
Impresión Caja Case	Cm <sup>3</sup>	\$ 1.000
Diseño Caja Case	Unid	\$ 30.000
Tornillos	Unid	\$ 120
Baterías	Unid	\$ 5.000
Ensamblaje Case	Unid	\$ 3.800
Pasta térmica	Unid	\$ 25.000
Lija	Unid	\$ 1.000
Desarrollo y soporte	Hora	\$ 4.300

Teniendo en cuenta el resultado de las encuestas, donde la mayor parte de los ganaderos cuentan con una concentración de *11 a 25 bovinos* con un 29% y *mayor a 100 bovinos* con un 27%, se calculó el valor esperado de la suma de todas las probabilidades con un resultado de 51 bovinos. A partir de estos resultados, se hizo la estimación de costos para la producción de 50 dispositivos el cual será el valor de estudio y referencia. Se realiza la estimación de un tamaño del lote que se espera fabricar al por mayor siendo la cantidad más atractiva para las características e intereses de los ganaderos. Al realizar las compras a los proveedores al por mayor, se espera obtener un descuento base del 10% en todos los productos que sean iguales o mayores a 50 unidades y a su vez construir vínculos verticales con los proveedores que permitan la fidelidad y rápida respuesta antes los requerimientos.

Tabla 15. Costos por lote. Autoría propia.

Costos Variables	Unidad de medida	Cantidad	Precio Unitario (\$ COP)	Precio con descuento (10%) (\$ COP)	Total (\$ COP)
Dispositivo Base protocolo LoRaWAN	Unid	50	\$ 105.000	\$ 94.500	\$ 4.725.000
Correa de Sujeción	Metros	75	\$ 9.000	\$ 8.100	\$ 607.500
Material Caja case	Gramos	4.750	\$ 80	\$ 80	\$ 380.000
Impresión Caja Case	Cm <sup>3</sup>	1.000	\$ 1.000	\$ 900	\$ 900.000
Diseño Caja Case	Unid	1	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000
Tornillos	Unid	400	\$ 120	\$ 108	\$ 43.200
Baterías	Unid	100	\$ 5.000	\$ 4.500	\$ 450.000
Ensamblaje Case	Unid	50	\$ 3.800	\$ 3.800	\$ 190.000
Pasta térmica	Unid	1	\$ 25.000	\$ 25.000	\$ 25.000
Lija	Unid	50	\$ 1.000	\$ 900	\$ 45.000
Desarrollo y soporte	Hora	150	\$ 4.300	\$ 4.300	\$ 645.500

Al realizar la unificación de los costos fijos y variables se tiene un costo total de:

Tabla 16. Costos totales. Autoría propia

<b>Costo por lote (\$ COP)</b>	\$ 9.081.420
<b>Costo unitario (\$ COP)</b>	\$ 181.628

A partir de los intereses del equipo de trabajo, se fija un porcentaje de ganancia del 20% el cual se espera repartir entre los 4 miembros del equipo y que está sujeto a variaciones dependiendo del nivel de ventas obtenido:

Tabla 17. Precio de venta. Autoría propia

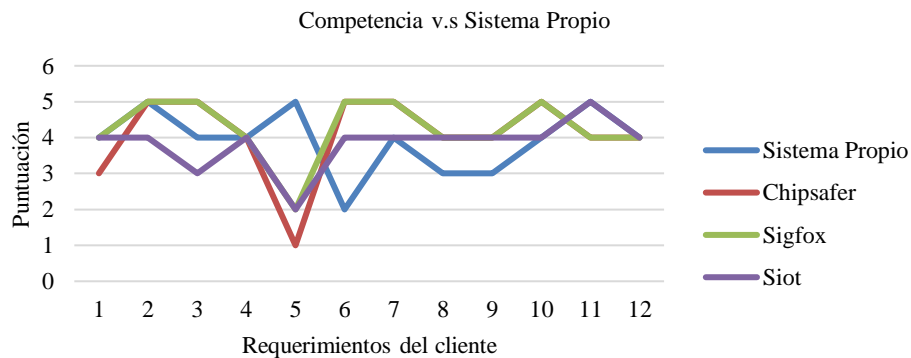
<b>Precio de venta unitario (\$ COP)</b>	\$ 217.953
<b>Ganancia por dispositivo (\$ COP)</b>	\$ 36.325
<b>Precio de venta por 50 dispositivos (\$ COP)</b>	\$10.897.680
<b>Ganancia total por 50 dispositivos (\$ COP)</b>	\$1.816.280

## 9.2 Comparación de precios ofrecidos por la competencia

Se hizo la identificación de los principales competidores del mercado tanto nacionales e internacionales con el objetivo de evaluar el posicionamiento del sistema propio diseñado frente a los requerimientos técnicos, de los clientes y la viabilidad. Para realizar la comparación se implementó la matriz del despliegue de la función de calidad (o QFD, por sus siglas inglesas) el cual es un método de diseño de productos y servicios que agrupa las demandas y expectativas de los clientes para definir las características técnicas y operativas, [52] donde los parámetros fueron obtenidos a partir de una lluvia de ideas e investigación sectorial. Ver *anexo 18*. La comparación con los competidores se realizó con una evaluación tanto de los requerimientos de los clientes como las especificaciones técnicas de interés del mercado, con calificación de (1-5) siendo 1 la mínima puntuación y 5 la máxima. Los requerimientos incluyeron aspectos que abarcaron temas relacionados con: diseño del case para el dispositivo, diseño de la interfaz y características del sistema e interfaz.

Tabla 18. Requerimientos del cliente y especificaciones técnicas. Autoría propia

N°	Requerimientos de los clientes	Especificaciones técnicas
1	Material Resistente	Sistema de alarmas
2	Aviso inmediato	Durabilidad
3	Interfaz Interactiva	Costos de producción
4	Facilidad de implementación	Diseño de la interfaz
5	Bajo costo	Practicidad
6	Larga duración de las baterías	Mantenimiento
7	Información en tiempo real	Tecnología
8	Alcance	Tiempo de respuesta
9	Soporte técnico	Capacidad del sistema
10	Sin afectaciones físicas	Confiability
11	Idioma Español (Colombia)	-
12	Manual del Usuario	-



Gráfica 24. Comparación competencia vs Sistema Propio. Autoría propia

Con los resultados obtenidos en la matriz QFD, ver *Anexo 18* se observa el posicionamiento del sistema propio frente a los principales competidores, donde se identificaron los tres mejores aspectos en los que se destaca el sistema propio o tiene un desempeño similar:

- ✓ *Bajo Costo*: siendo superior en promedio 3,5 puntos, gracias a que se evitan costos de importación, la mano de obra es más económica en el país, el diseño es propio y se cuenta con una estrategia de penetración en el mercado en la cual, se espera ganar la lealtad de los clientes y atraer a nuevos

clientes potenciales al vender a un precio más económico que la competencia y con el posicionamiento en el sector, incrementar su precio de venta.

- ✓ *Aviso Inmediato*: este requerimiento se encuentra por encima de un competidor en 1 punto y en las mismas condiciones con los otros competidores, gracias a que cuenta con un sistema de alarmas frente anomalías de diferentes variables y actualización cada 5 minutos de los datos obtenidos.
- ✓ *Facilidad de Implementación*: se encuentra en el mismo nivel y rendimiento que sus competidores tanto para la integración de los componentes del sistema, como del dispositivo al bovino.

Sin embargo, el sistema propio diseñado se encuentra rezagado en los aspectos referentes a:

- ✓ *Larga Duración de las Baterías*: se encuentra en promedio por debajo de la competencia en 2,6 puntos, siendo el aspecto con mayor oportunidad de mejora, ya que a pesar de que se puede realizar una recarga periódica cada 68 días, los principales competidores cuentan con paneles solares integrados que realizan la recarga continua de las baterías, sin detener el funcionamiento del sistema.
- ✓ *Alcance y Soporte técnico*: ambos factores se encuentran con una calificación inferior en un 1 punto frente a la competencia, ya que ellos disponen de una mejor infraestructura de instalación del sistema. A su vez, la experiencia y capacidad de los principales competidores permiten brindar un soporte técnico con mejor rendimiento.

### 9.3 Evaluación de costo-beneficio en los ganaderos

Para la evaluación de los beneficios que obtendrían los ganaderos, se identificaron tanto beneficios extrínsecos como intrínsecos de la implementación del sistema para su funcionamiento. Para su obtención, se realizó la caracterización de los principales riesgos, siendo el de mayor preponderancia el abigeato con mayor incidencia e incremento en ciertas regiones del país y representa una de las mayores pérdidas para su economía. Según los resultados obtenidos en las encuestas el 47% de los ganaderos ha sufrido alguna vez un hurto por abigeato, con un promedio de 9 robos por predio y 13 bovinos hurtados por cada robo. Al contar con una probabilidad de abigeato del 47% y un 25,5% de animales hurtados por predio, se obtiene que la probabilidad de que ambos eventos sucedan simultáneamente es de 11,98%, dato que, al ser multiplicado por los 50 bovinos del predio, da como resultado un riesgo por abigeato de 6 animales. A partir de esto, *ver anexo 17 y 19*.

Para los costos extrínsecos y a partir de los resultados de las encuestas, se determinó la inversión mensual promedio que realiza un ganadero para el cuidado y la manutención de los bovinos, en los que se incluyen a nivel general temas relacionados con [53]:

- ✓ Medicamentos y cuidados veterinarios
- ✓ Arreglos del terreno
- ✓ Prestación de mano de obra
- ✓ Arriendo de pastos o consumo de alimentos
- ✓ Sales minerales entre otros insumos

A partir de esto, se determinó el costo mensual que invierte un ganadero por animal para un total 50 bovinos.

Tabla 19. Costos operativos por bovino. Autoría propia.

<b>Costo mensual por animal (\$ COP)</b>	\$ 74.329
<b>Costo total (\$ COP)</b>	\$ 3.716.450

Teniendo en cuenta el número esperado de bovinos hurtados se hace una aproximación del precio de un bovino a partir del precio promedio de venta de un kilogramo de carne en los frigoríficos del país estimado para el mes de octubre del 2021 según FEDEGAN [54], donde el peso promedio del ganado para las razas más importantes oscila entre 450 kg - 600 kg, con una esperanza de vida promedio entre los 2 a 3 años [55].

Tabla 20. Datos promedio por ganado. Autoría propia

<b>Precio promedio del kilo (\$ COP)</b>	\$6.800
<b>Peso promedio bovino</b>	550 kg
<b>Esperanza de vida promedio</b>	2 años

<b>Precio bovino (\$ COP)</b>	\$ 3.740.000
<b>Precio número esperado de ganado hurtado (\$ COP)</b>	\$ 22.440.000
<b>Riesgo mensual por hurto (\$ COP)</b>	\$ 935.000

Luego de la determinación del riesgo de mayor afectación de los ganaderos, se hizo la identificación de otros posibles riesgos que se podrían evitar cuando se tienen métodos de vigilancia y control, entre los que se encuentran los riesgos de muerte que pueden presentarse por enfermedad no tratada a tiempo o nunca tratadas [56] y riesgos por daños en las cercas y linderos que están ligados a las afectaciones en propiedades vecinas, siendo de las más frecuentes, el consumo de pastos ajenos [57]. Con base en esto se calcula el riesgo total que puede sufrir un ganadero y los costos que estos le implicarían. *Ver anexo 17.*

*Tabla 21. Otros factores de riesgo. Autoría propia*

<b>Tasa de mortalidad por enfermedad</b>	2%
<b>Riesgo mensual por enfermedad por bovino (\$ COP)</b>	\$71.800
<b>Costo por delimitación semestral (\$ COP)</b>	\$170.000
<b>Riesgo mensual por delimitación (\$ COP)</b>	\$28.333
<b>Riesgo Total sin incluir abigeato (\$ COP)</b>	\$103.333
<b>Riesgo total mensual (\$ COP)</b>	\$1.038.133

Durante la vida útil del dispositivo, se tienen en cuenta costos que se generan por el paso del tiempo y las condiciones de uso del sistema de monitoreo. A partir de esto se determinan costos por mantenimientos preventivos y correctivos tanto para la parte física del dispositivo como para los software y bases de datos, estableciendo periodos de tiempo.

*Tabla 222. Costos durante vida útil. Autoría propia.*

<b>Mantenimiento preventivo</b>	\$290.000	Semestral
<b>Mantenimiento correctivo</b>	\$50.000	Triannual
<b>Recarga de las baterías</b>	\$18.000	Trimestral
<b>Correa</b>	\$12.000	Bianual

Al realizar la comparación del porcentaje de mitigación del riesgo que ofrecen los principales competidores, que se encuentra en promedio en 70%, se hizo una estimación de la mitigación que proporcionaría el sistema diseñado, basada en los registros por denuncias de abigeato registrados en la Policía Nacional, donde se establece que aproximadamente el 75,5% de los casos ocurrieron sin la utilización armas de fuego o corto punzantes, dejando aproximadamente un 25% en promedio de los casos fuera del alcance del sistema de monitoreo por la modalidad. Por otra parte, según la depreciación que sufren los dispositivos del sistema diseñado, se estableció una vida útil de 5 años, la cual se basa en la tasa de depreciación fiscal anual porcentual, donde se determina que para los equipos de computación, redes de procesamiento de datos y equipos de comunicación, el porcentaje equivalente anual es del 20%, teniendo en cuenta esta clasificación, se realizó el cálculo del ROI que permitió conocer el retorno sobre la inversión que recibirá el ganadero, ver *Anexo 20.*

*Tabla 233. Mitigación y ahorro esperado. Autoría propia.*

<b>Mitigación del riesgo</b>	71.75%
<b>Valor esperado de la mitigación</b>	\$744.896
<b>Precio final del sistema de monitoreo</b>	\$217.953
<b>Costo de licencias</b>	\$122.600
<b>Promedio de ahorro estimado mensual</b>	\$608.035
<b>Vida útil del dispositivo</b>	5 años
<b>ROI anualizado (5 años)</b>	25,4%
<b>ROI (\$)</b>	\$ 3,1

## 10. COMPONENTE DE DISEÑO EN INGENIERÍA

### 10.1 Declaración de diseño

Este trabajo se enfoca en desarrollar un sistema de monitoreo que permita conocer datos en tiempo real relacionados con la ubicación y la temperatura superficial del ganado bovino, utilizando tecnología LPWAN, integrado por una red de transmisión de información entre el dispositivo adherido al ganado bovino y la interfaz del usuario.

## 10.2 Requerimientos de desempeño

Se debe llegar a un prototipo del sistema de monitoreo, el cual será adaptable a las condiciones del lugar de aplicación. La capa física del sistema contará con características de durabilidad y resistencia en el medio exterior, además, para la implementación del dispositivo en el ganado bovino no se tendrá ninguna repercusión en la salud del animal. Se contará con un sistema de alarmas ante irregularidades en la ubicación, según los límites establecidos en el terreno y/o rango de temperatura. Finalmente, la interfaz permitirá la visualización de datos en tiempo real con actualizaciones recibidas en promedio cada 5 minutos, la cuál será de fácil uso, intuitiva e interactiva, de manera que sea entendible para todo tipo de usuario.

## 10.3 Pruebas de rendimiento

### 10.3.1 Case del dispositivo

Se realizó un análisis estático tanto para la parte principal como para la tapa inferior del case, con el objetivo de determinar la resistencia de la estructura y evaluarla al momento de ser sometida a fuerzas constantes a través del tiempo. Dichos elementos fueron sometidos a fuerzas aplicadas entre los 500N y los 3500N dependiente de la dirección de la fuerza y el lugar de aplicación. Se tomó 3500N como fuerza máxima ejercida por un bovino con 2 años, en sentido perpendicular a la parte superior del case. También es importante resaltar que las fuerzas varían entre el rango mencionado dependiendo de la probabilidad de ejercer una fuerza absoluta y si la fuerza es aplicada directamente por el objeto con el cual impacta el bovino o de las fuerzas de reacción, en el caso de la tapa, que está en contacto directo con la piel del bovino o a las fuerzas aplicadas por la correa en las alas de sujeción.

Finalmente, también se aplicaron fuerzas de presión en las partes horizontales del dispositivo, con el fin de considerar las reacciones físicas al momento de ejercer algún tipo de impacto contra una superficie sólida como un árbol, poste eléctrico o piedra. Para realizar el análisis estático, se utilizó la herramienta SolidWorks, considerando las propiedades del material ABS y las fuerzas anteriormente explicadas. Para ver los informes del análisis estático *ver el anexo 21 y 22*. A partir de los resultados del análisis estático se evidencio que:

- Tanto para la tapa inferior como para la parte principal, la tensión de Von Mises no supera la tensión máxima admisible por el material del case, principalmente debido al límite elástico del material ABS, es decir que, el case cumple con los requerimientos de diseño dado que no se presentará fluencia en ninguna parte del mismo, presentando mayor riesgo en la ubicación del sensor térmico que se localiza dentro de la tapa inferior, con un resultado de  $1,348e07$  N/m<sup>2</sup>, el cual no se considera crítico, además el sensor está en contacto con la piel del bovino, que es una superficie blanda.
- La deformación unitaria es una medida adimensional, dado que es una relación del cambio de longitud con respecto a una longitud inicial. Se puede observar que, el límite superior del rango es de 2,102 mm, que representa un riesgo de deformación en la parte superior de la caja que, al ser contrastado con la deformación unitaria equivalente, da como resultado un material lo suficientemente duro para no presentar deformaciones ante las fuerzas aplicadas. Es decir, la parte superior de la caja y las alas de sujeción son quienes estarán bajo mayor riesgo de deformación, pero en ninguno de los casos implica un cambio de material necesario para el case, puesto que, la deformación unitaria equivalente arroja un coeficiente de deformación máximo de  $8,709e-02$  mm y una escala de 4,51.

### 10.3.2 Collar del dispositivo

El collar del dispositivo está compuesto por dos partes principales: la correa con un largo de 130 cm, ancho de 3 cm y alto de 0,5 cm, está compuesta por un material de caucho con aberturas para ajustar y sostener el case a una distancia determinada; y la hebilla del collar encargada de prensar y fijar la correa, compuesta en su totalidad de acero inoxidable. Al igual que la prueba aplicada para el case, las fuerzas variaron por encima de los 500N, dependiendo del lugar de aplicación y la dirección de la fuerza. Para poder realizar el análisis estático, se acudió a la herramienta de SolidWorks, considerando las propiedades del material y las fuerzas anteriormente explicadas. Para ver los informes del análisis estático ver anexo 23 y 24. A partir de los resultados del análisis estático se evidencio que:

- Para la hebilla del collar no se presentan riesgos físicos en ninguna de las pruebas aplicadas, debido a las propiedades del acero y la estructura compacta de la hebilla.
- Para la correa se presentaron posibles fallos en las aberturas por deformación unitaria, con un valor de deformación de  $3,418e+00$ , debido al coeficiente de elasticidad del caucho, sin embargo, la prueba de Von Mises demuestra que no existe riesgo de fluencia.

### 10.4 Restricciones

- El acceso a señal, red o internet es inexistente en algunas regiones del país.
- El alcance de las puertas de enlace no supera los 10 km en áreas rurales.
- El alcance de las puertas de enlace no supera los 5 km en áreas urbanas.
- Los tiempos de importación de componentes duran entre 30 a 90 días hábiles (sujeto a demoras debido a inconvenientes por la pandemia).
- La duración de las baterías es de 68 días, para aumentar la duración se debe aumentar el tamaño del dispositivo.
- La banda ancha es cada 200 - 250 Khz para tecnologías GSM y LPWAN.
- Capacidad de almacenamiento de la base de datos del servidor del sistema de monitoreo.
- El ganado tiene puntos específicos de aplicabilidad para la herramienta de rastreabilidad y estos pueden reducirse debido a la no aprobación por todos los entes involucrados.
- No debe afectar en ningún aspecto la vitalidad y salud del animal.
- Altos costos de adquisición de las herramientas tecnológicas necesarias.

### 10.5 Cumplimiento del estándar

Para garantizar que las pruebas del sistema cumplieran con la norma ISO / IEC / IEEE 29119 de 2013- Ingeniería de software y sistemas — Pruebas de software —Parte 2: Procesos de prueba. Se ha adaptado la implementación del contenido de tal forma que, se estableció y se llevó a cabo el conjunto de procesos para la realización de las pruebas de acuerdo con el estándar y la metodología establecida para el desarrollo de cada capa del sistema de monitoreo, en la que se identificaron las especificaciones y estrategias para la obtención de resultados, *ver Anexo 16*, para su posterior análisis.

## 11. RESULTADOS

Los resultados del sistema de monitoreo diseñado se evidencian mediante el desarrollo de las capas definidas, según la metodología de la arquitectura basada en la tecnología de Internet de las Cosas (IoT).

### 11.1 Capa física

Esta capa integra el dispositivo físico y el diseño del case, es decir, los componentes electrónicos seleccionados y el proceso de fabricación del case del dispositivo. La fabricación se realizó mediante impresión 3D con el material ABS M30. Para garantizar el funcionamiento del dispositivo, así como el diseño adecuado del case, se realizaron pruebas de campo. Estas pruebas fueron realizadas en la finca San Cipriano,

ubicada en el municipio de Tibasosa. Para el desarrollo de estas pruebas se seleccionó un ejemplar macho bovino de un año. El dispositivo diseñado se empleó en el animal como se puede observar en la *gráfica 28*.



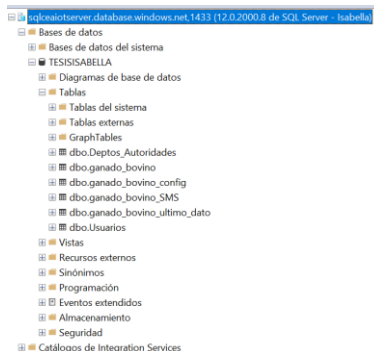
Gráfica 25. Prueba del dispositivo en un ejemplar bovino. Autoría propia.

## 11.2 Capa de acceso

Corresponde a los protocolos de comunicación utilizados para la transferencia de datos, los cuales son LoRaWAN, que es el protocolo que permite obtener los datos de los dispositivos mediante el Gateway y MQTT, que permite el envío de datos desde el Gateway hasta la base de datos creada para el sistema. Cada uno de estos protocolos se explicó previamente en el documento.

## 11.3 Capa de integración de la información

Mediante la utilización de Microsoft SQL Server se creó una base de datos tipo SQL en el servidor tcp:sqlceaiotserver.database.windows.net,1433 para la recepción de información enviada desde el Gateway. Esta base de datos permite organizar y actualizar los datos de manera ordenada y estructurada. Dentro de la base de datos se crearon diferentes tablas, que facilitan la interacción entre Azure SQL Database y Power BI, aplicación para el desarrollo de la interfaz.



Gráfica 26. Visualización de base de datos en Microsoft Management Studio. Autoría propia.

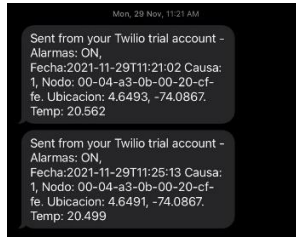
## 11.4 Capa de interfaz

La interfaz del usuario fue diseñada dependiendo de los resultados que se obtuvieron en la encuesta a los ganaderos. La interfaz de usuario se diseñó de manera interactiva, permitiendo que el ganadero interactúe con diferentes datos según sus necesidades. Dentro de este diseño se resalta el uso de mapas y gráficos para que se pueda identificar y visualizar de manera correcta los datos. La interfaz cuenta con diez páginas, cada una de estas contiene información relevante para el sistema de monitoreo y están explicadas detalladamente en el manual de usuario, ver *Anexo 25*.



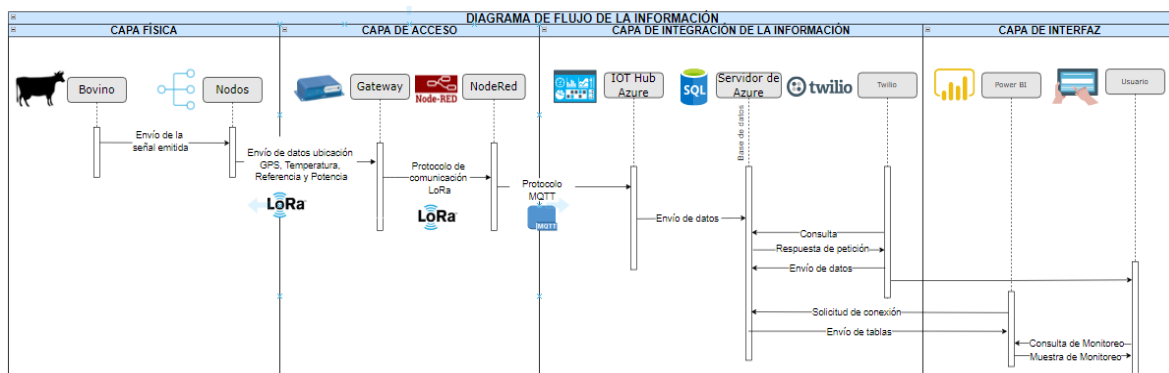
- a. Página de Inicio:** es la primera vista que encuentra el usuario al abrir la interfaz. Esta página contiene el menú de botones a los cuales el usuario puede ingresar. Cada uno de estos botones dirige al usuario a una página diferente con la información relacionada del mismo.
- b. Página de Datos:** el ingreso se realiza mediante el botón de *datos* en el menú de inicio. Esta página contiene toda la información relacionada a los datos del usuario y los bovinos. Permite seleccionar diferentes usuarios y permite conocer la información única por bovino. Además, contiene diferentes íconos que facilitan la interpretación de los datos.
- c. Página de Ubicación bovino:** esta página le permite al usuario interactuar con un mapa donde se puede observar el último punto de ubicación del bovino dentro del terreno. Además, permite que el usuario visualice todos los nodos al mismo tiempo o seleccione únicamente la ubicación de un nodo en específico en la tabla, donde cada bovino tiene una referencia de nodo única.
- d. Página Temperatura bovinos:** contiene la información relacionada con la temperatura superficial de cada bovino. El usuario debe seleccionar una referencia específica para observar el último dato de temperatura emitido por el dispositivo y una gráfica del comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo. Además, contiene información relacionada con los rangos estándar de temperatura: normal, de advertencia y crítico.
- e. Página Alarmas:** contiene la información relacionada con el funcionamiento del sistema de alarmas. Permite visualizar un histórico de todos los mensajes de alarma que han sido enviados y explica cada una de las causas que se pueden presentar en el mensaje. El uso de íconos e imágenes permite que el usuario identifique y comprenda de manera sencilla la información presentada.
- f. Página de Históricos:** contiene la información histórica de cada bovino, permite visualizar el recorrido o la ubicación exacta en puntos de latitud y longitud en un periodo de tiempo. También se presenta una tabla donde el usuario puede identificar las variables de fecha de medición, latitud, longitud y temperatura.
- g. Página de Contacto de emergencia:** facilita al usuario información para el contacto con las autoridades. Permite conocer la línea de atención nacional para emergencias y los datos de contacto por cada departamento. Los usuarios deben seleccionar un departamento para conocer un número telefónico, un correo electrónico y una dirección de las autoridades.
- h. Página Social:** esta página contiene diferentes plataformas, blogs y foros relacionados con el sector agropecuario en Colombia y que podrían ser de interés para el ganadero. El usuario puede acceder al dar clic sobre alguna imagen. Cada plataforma está detallada dentro del manual del usuario, *ver Anexo 25*, para que el ganadero identifique la información que puede encontrar en cada uno.
- i. Página de Descarga de datos:** esta página permite al usuario visualizar los datos históricos de las variables de todos los bovinos en el sistema. Además, contiene un botón que direcciona al usuario a un documento de Excel con los datos actualizados para su consulta o descarga.
- j. Página Sobre nosotros:** contiene información sobre los autores del sistema, el propósito del trabajo realizado, así como datos de contacto para alguna solicitud que se presente. Adicional se creó un formulario para presentar peticiones, quejas, reclamos o felicitaciones. El usuario puede acceder al dar clic en el botón llamado *Formulario de PQR*.

Esta interfaz puede ser consultada mediante el enlace: [Interfaz sistema de monitoreo](#), sin necesidad de una aplicación móvil para su visualización. De igual forma, se realizó un manual de uso de la interfaz del usuario para un mejor entendimiento y un uso adecuado de la misma. Este documento puede ser encontrado en el Anexo 25. En conjunto con lo anterior, el usuario recibe un mensaje de texto en su celular, cuando el sistema de alarmas es activado con información relevante para una toma de decisiones rápida.



Gráfica 28. Mensaje de texto enviado al usuario. Autoría propia.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se realizó la *gráfica 35*, que corresponde al diagrama de flujo de información, en el que se incluyen todas las capas del sistema integrado de monitoreo y las aplicaciones, herramientas o softwares que interactúan con la información del sistema. Aquí se puede observar la comunicación entre cada capa y las acciones de consulta y respuesta que realiza cada actor para enviar la información recopilada desde el bovino hasta ser enviada al usuario final, quien visualiza la información mediante la interfaz.



Gráfica 29. Diagrama integrado del flujo de información por capas del sistema. Autoría propia.

## 11.5 Impacto Social

Uno de los impactos sociales más representativos del proyecto, se presenta en el mejoramiento de la calidad de vida de los ganaderos, con la automatización del monitoreo en ámbitos de ubicación y temperatura de los bovinos, lo cual genera beneficios productivos, sociales y económicos a los ganaderos, al contribuir con una rápida respuesta ante las anomalías, que ha sido inasequible por el poco desarrollo tecnológico en este sector. A su vez, el sistema aporta seguridad, tranquilidad y prevención de riesgos, en un sector que ha tenido poca inversión para su crecimiento. Por tal razón, el continuo desarrollo de proyectos con enfoque tecnológico y las inversiones del Gobierno para el mejoramiento de la conectividad, permiten un ritmo favorecedor en el progreso del sector ganadero siendo importante para la economía del país.

A su vez, junto con el ahorro monetario que tiene el ganadero, se obtienen beneficios intrínsecos, que fueron identificados en la encuesta realizada, donde los beneficios y la perfección de ganadero más valorados fueron: *Seguridad* con un 68,9%, como la posibilidad de mantener a los bovinos dentro del perímetro de su predio con aviso inmediato ante cualquier anomalía; *Control y Orden* con un 49% al permitir monitorear en tiempo real a los bovinos para hacer seguimiento del recorrido y/o cambios bruscos de temperatura; *Tranquilidad y la Prevención de Riesgos* ambas con un 36%, debido al rápido aviso a las autoridades y visualización en cualquier lugar. Además, se destaca el hecho de que todos los ganaderos encuestados consideraron que el monitoreo de sus reses generaba al menos un beneficio [58].

Tabla 244. Beneficios del monitoreo. Autoría propia.

<b>Seguridad</b>	68,9%
<b>Disminución de costos</b>	15,3%
<b>Control y Orden</b>	49,0%
<b>Salud</b>	19,4%
<b>Protección</b>	30,1%

<b>Tranquilidad</b>	36,7%
<b>Prevención de riesgos</b>	36,2%
<b>Ningún beneficio</b>	0,0%

## 11.6 Impacto Ambiental

El sistema de monitoreo diseñado no genera impactos ambientales negativos en su implementación, debido a que el sistema está diseñado para tener una vida útil de 5 años gracias a su resistencia, durabilidad y capacidad. Además, no genera ningún impacto en la salud del animal, ya que no es implantado ni ingerido por el bovino. Sin embargo, se debe tener en cuenta el material seleccionado, ABS M30, para el proceso productivo del case, porque es un polímero difícil de reciclar y su producción no controlada puede generar un impacto negativo en el ambiente. Por esta razón, el sistema se diseñó para que cada dispositivo pueda ser reutilizado o transferido a otro animal según sea el caso, también se seleccionaron baterías recargables que permiten generar menores desechos para el medio ambiente.

## 12. LIMITACIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 12.1 Limitaciones

La principal limitación del desarrollo del sistema de monitoreo se relacionó con la implementación del dispositivo electrónico en el proceso de: adquisición de partes electrónicas, debido a la escasez de materia prima en el país y en el mundo, esto implicó un largo proceso de importación de varias partes, aumentando los tiempos de entrega y solución. Además, por políticas gubernamentales recientes, las partes importadas fueron detenidas un tiempo considerable dentro de Aduanas y requirió de un pago de impuestos; mantenimiento electrónico, por la sensibilidad de las partes electrónicas al ser sometidas a ambientes de pruebas reales, se vio afectada la integridad de los circuitos disminuyendo el número de nodos disponibles y aumentando los tiempos de desarrollo del sistema de monitoreo. La pandemia y emergencia sanitaria fueron otra limitación para la aplicación de pruebas en campo. Sumado a las limitaciones anteriores, se cuenta con una limitación de fechas de entrega del Trabajo de Grado, estipulada por el departamento de la carrera de Ingeniería Industrial.

### 12.2 Conclusiones

- Como resultado, se concluye que el sistema de monitoreo para ganado bovino diseñado cumple funcionalmente con los requerimientos y estándares planteados, de tal forma que fue posible su implementación en un ambiente de prueba real, donde todos los actores cumplieron correctamente su función permitiendo el flujo de información hasta el usuario final. Los datos obtenidos en campo permitieron determinar factores significativos relacionados con el entorno y condiciones físicas del bovino, permitiendo una mayor confiabilidad del sistema. Además, se identifica que el dispositivo puede ser usado varios animales del sector agrícola, como lo es, los equinos, los ovinos y otros.
- El modelo del dispositivo diseñado permitió obtener un prototipo que cumpliera con los requerimientos planteados, garantizando un adecuado uso del espacio interno, al ser un modelo compacto que no afecta negativamente la salud del animal. Además, los análisis estáticos permitieron concluir que, ante fuerzas aplicadas entre los 500N y los 3.500N que asemejan el impacto del bovino con una superficie sólida, el dispositivo no presentó riesgo de deformación unitaria o fluencia, resultado del diseño del case con un grosor mínimo de 5 mm y del material de fabricación ABS.
- La programación en Azure SQL Database permitió un correcto flujo de información entre tablas estructuradas que contribuyó a un adecuado envío e interacción de los datos para el sistema de alarmas y la interfaz. Según los resultados del sistema de alarmas evaluado, el envío efectivo de alarmas permite una reacción rápida y eficaz al tener un porcentaje de error de tan solo el 5%. Estas alarmas permiten conocer la situación de riesgo que ocasiona variaciones significativas de temperatura y ubicación geográfica. Se establecieron cuatro casos de alarma, los cuales comprenden las posibles alteraciones o anomalías que se pueden presentar en las variables establecidas, de acuerdo con la criticidad del incidente y la necesidad de rápida respuesta reflejado en los intervalos de tiempo y número de alertas generadas.

Además, las alarmas fueron enviadas por mensajes de texto, mediante Twilio, al usuario final con acceso a red móvil, sin la necesidad del servicio de internet.

- La interfaz para el usuario se realizó de una manera dinámica e intuitiva que permitiera el fácil entendimiento para personas del sector ganadero utilizando la aplicación PowerBI. La interfaz se estructuró en tres bloques: información general, estadísticas e información en tiempo real, e información de contacto. El acceso a la interfaz pudo realizarse sin ninguna limitación al tener disponibilidad de internet y un teléfono móvil o computador sin requerir una aplicación instalada.
- Como resultado de la fase de evaluación, se puede concluir que gracias al uso de la estructura del Internet de las Cosas (IoT), la transferencia de datos a través del sistema integrado es inmediata y el intervalo promedio de envío de información por parte del dispositivo es de 4,22 minutos, el cual depende de factores externos como la zona (rural o urbana), la hora del día, la distancia y/o altura del Gateway. El sistema tuvo un alcance máximo 449,18 m con una altura del Gateway de 4 m.
- Para el objetivo de análisis económico se puede concluir que, los beneficios tanto intrínsecos como extrínsecos son representativos para los ganaderos, lo cual permitió una viabilidad en la adquisición del sistema de monitoreo con un precio final de \$217.953 COP por dispositivo. La inversión inicial para un lote de 50 dispositivos de determinó en \$10'897.680 COP con una mitigación del riesgo de 71,75%. Además, se estableció un retorno sobre la inversión a cinco años de \$3,1 COP, que representa el 25,40% anualizado.

### 12.3 Recomendaciones

- Para estudios futuros, se recomienda la integración de otros nodos al sistema, que permitan la evaluación de su capacidad, envío y recepción de datos de manera simultánea, sin que se presenten interferencias entre dispositivos.
- Se recomienda agregar nuevas variables de estudio al sistema como: ritmo cardiaco, frecuencia respiratoria, la humedad del ambiente y, además de limitar los cambios repentinos de temperatura dependiendo la velocidad de variación. Esto permite la generación de posibles estados de alerta, donde se pueden clasificar diferentes efectos en la salud del animal de forma detallada, como enfermedades crónicas, respiratorias, periodos de celo, entre otros.
- Dentro del proceso de diseño se planteó un collar tipo ancla, compuesto por caucho y acero inoxidable, que cumplió con las pruebas estáticas realizadas con fuerzas mayores a los 500N. Sin embargo, por limitaciones relacionadas con el tiempo y material, no fue posible la producción y aplicación del collar diseñado. A partir de esto, se recomienda utilizar el diseño para pruebas posteriores, debido a los resultados favorables de los análisis estáticos, comodidad de uso y facilidad de fabricación.
- Se recomienda el mejoramiento de la infraestructura en la instalación del Gateway para tener un mayor radio de alcance que cumpla con los requerimientos de extensión del predio, ya que, la tecnología LPWAN se caracteriza por tener una cobertura de aproximadamente 15 kilómetros en áreas rurales y 5 kilómetros en áreas urbanas, en conjunto con la evaluación para la implementación de otro tipo de Gateway que permita por sus características un mayor alcance.
- Se recomienda la implementación de métodos de recarga autónomos para las baterías, como paneles solares, sin la necesidad de detener el sistema en un periodo de tiempo. Esto permitirá posicionar al sistema en un nivel superior frente a sus principales competidores.
- Se recomiendan hacer pruebas en diferentes condiciones climáticas y factores ambientales, para evaluar la resistencia del dispositivo ante la permeabilidad y el comportamiento de la recepción y envío de datos bajo condiciones desafiantes.

### 13. REFERENCIAS

- [1] F. L. D. d. León, «Prevención y Control de abigeato de bovinos: estudio de caso, de 3 localidades de Tamuín, San Luis Potosí. 2008 - 2018 ( Primera parte),» *Visión Criminológica-criminalística*, nº 25, pp. 96-109, 29 Enero - Marzo 2019.

- [2] CONtexto ganadero, «La ganadería colombiana es un ‘diamante en bruto’ según Oscar Cubillos,» INTERLAT.CO, 2 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.contextoganadero.com/reportaje/laganaderia-colombiana-es-un-diamante-en-bruto-segun-oscar-cubillos>. [Último acceso: 6 Julio 2020].
- [3] FEDEGÁN, «Ganadería Colombiana HOJA DE RUTA 2018 - 2022,» Bogotá, 2018.
- [4] J. F. R. Cuadrado, «La historia y el presente de las cifras delictivas y contravencionales en Colombia: Un nuevo conocimiento.,» *Revista Criminalidad*, vol. 50, n° 1, pp. 109-110, 2008.
- [5] FEDEGAN, «Más de \$15 mil millones perdieron los ganaderos por abigeato en 2014,» [En línea]. Available: <https://www.fedegan.org.co/noticias/mas-de-15-mil-millones-perdieron-los-ganaderos-por-abigeato-en-2014>. [Último acceso: 13 Julio 2020].
- [6] CONtexto Ganadero, «Modalidad más usada de abigeato: ‘pelar’ animales y no dejar rastro,» 20 Marzo 2014. [En línea]. Available: <https://www.contextoganadero.com/internacional/modalidad-mas-usada-de-abigeato-pelar-animales-y-no-dejar-rastro>. [Último acceso: 14 Febrero 2021].
- [7] CONtextoganadero, «Disminuye abigeato en lo corrido del gobierno Duque,» 8 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.contextoganadero.com/regiones/disminuye-abigeato-en-lo-corrido-del-gobierno-duque>. [Último acceso: 2020 Junio 6].
- [8] DANE, «Boletín Técnico Encuesta de Convivencia y Seguridad Ciudadana,» Bogotá, 2018.
- [9] M. Olaya, «RCN Radio,» 30 12 2018. [En línea]. Available: <https://www.rcnradio.com/economia/fedegan-espera-que-con-nueva-ley-el-robo-de-ganado-se-reduzca-en-2019>. [Último acceso: 10 5 2021].
- [10] FEDEGÁN, «Precio del ganado gordo y falco en pie,» 20 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.contextoganadero.com/economia/asi-arranco-el-precio-del-ganado-en-2020>. [Último acceso: 10 Mayo 2021].
- [11] X. González, «AGRONEGOCIOS,» 25 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.agronegocios.co/ganaderia/a-que-edad-y-con-que-peso-se-debe-sacrificar-el-ganado-segun-su-raza-2982496#:~:text=Y%20es%20que%2C%20seg%3BAN%20Javier,sacrificio%20hasta%20los%20600%20kg..> [Último acceso: 10 Mayo 2021].
- [12] C. Ganadero, «Contexto Ganadero. Es necesario controlar la temperatura de los animales.,» 2 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/es-necesario-controlar-la-temperatura-de-los-animales#:~:text=El%20bovino%20necesita%20mantener%20una,puede%20ocasionar%20la%20muerte%20súbita>. [Último acceso: 1 Mayo 2021].
- [13] F. Olivera Atenssia y L. Lezcano Bollini, «Evaluación del uso de sensores subcutáneos para determinar las variaciones de temperatura corporal de los bovinos,» Udelar.fd, Montevideo, 2019.
- [14] D. J. McCafferty, D. J. McCafferty y A. Nord, «Challenges of measuring body temperatures of free-ranging birds and mammals,» *Animal Biotelemetry*, n° 33, 2015.

- [15] L. Heikell, «Las vacas conectadas ayudan a monitorear el ganado en las granjas,» 19 Agosto 2015. [En línea]. Available: <https://news.microsoft.com/es-xl/features/las-vacas-conectadas-ayudan-a-monitorear-el-ganado-en-las-granjas/> . [Último acceso: 1 Mayo 2021].
- [16] R. E. Galarza Aguirre y F. G. Gutiérrez Muela, «Relación entre la temperatura corporal posparto y el comportamiento reproductivo en vacas,» Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, 2015.
- [17] L. R. Pérez García, «Estrés calórico en ganado lechero,» 09 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.ganaderia.com/destacado/Estr%C3%A9s-cal%C3%B3rico-en-ganado-lechero-I%3A-sus-componentes-y-sus-efectos>. [Último acceso: 1 Diciembre 2021].
- [18] IntaInforma, «Presentan sistema de monitoreo para vacas lecheras,» 20 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://intainforma.inta.gob.ar/presentan-sistema-de-monitoreo-para-vacas-lecheras/>. [Último acceso: 1 Mayo 2021].
- [19] FEDEGAN, «Programa de Innovación y Desarrollo Tecnológico Productivo,» [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/piratas-de-la-carne-una-amenaza-contr-la-economia-y-la-salud-61939>. [Último acceso: 17 Junio 2020].
- [20] Instituto Tecnológico de Aguascalientes, «El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras,» Conciencia Tecnológica, Querétaro, México, 2017.
- [21] digitanimal, «Toma el control de tu ganadería».
- [22] Smart Net, «Usando IoT se Incrementa la Eficiencia, Productividad en la Ganadería,» Smart Net - Conectividad Creativa, 2021. [En línea]. Available: <https://www.smartnet.com.co/usando-iot-se-incrementa-la-eficiencia-productividad-en-la-ganaderia/>. [Último acceso: 8 Mayo 2021].
- [23] vjoycar, «Minirastreador con gps, sistema de monitoreo de actividad v34 para Vaca, caballo, ganado, collar, localizador solar antipérdida,» alibaba, [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/mini-sheep-animal-gps-tracking-v34-activity-monitoring-system-for-cow-horse-cattle-collar-gps-anti-lost-solar-tracker-62159107605.html?spm=a2700.themePage.107016438.3.6881233daWI4L9>. [Último acceso: 9 Mayo 2021].
- [24] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «La ganadería y el medio ambiente,» FAO, 2022. [En línea]. Available: <https://www.fao.org/livestock-environment/es/>. [Último acceso: 20 Junio 2021].
- [25] B. Oviedo Bayas y G. E. Miranda Tinoco, «Uso de red de sensores inalámbricos y su incidencia en la geolocalización del ganado vacuno de la finca experimental la maría-UTEQ,» Journal of Alternative Perspectives in the Social Sciences (, 2018.
- [26] B. Ortiz Aldana y N. L. Fonseca Ochoa, «SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA Y POSICION PARA BOVINOS UTILIZANDO UNA RED DE COMUNICACIÓN LORAWAN,» Pontifica Universidad Javeriana, Bogotá, 2021.
- [27] Comunicaciones, Ministerio de Tecnologías de la Información y las, «“Colombia superó los 8 millones de accesos fijos a internet en el primer trimestre de 2021”: Karen Abudinen, ministra TIC,» 21 Julio

2021. [En línea]. Available: <https://mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/178505:Colombia-supero-los-8-millones-de-accesos-fijos-a-internet-en-el-primer-trimestre-de-2021-Karen-Abudinen-ministra-TIC>. [Último acceso: 25 Septiembre 2021].
- [28] DANE, «Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) 2020,» 2020. [En línea]. Available: <https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=6856b9c063254c36b094d5709401d19d>. [Último acceso: 25 Septiembre 25].
- [29] DANE, «CENSO NACIONAL DE POBLACIÓN Y VIVIENDA,» 2018. [En línea]. Available: <https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=2749922ca5f8469db9990986c02b1b93>. [Último acceso: 25 septiembre 2021].
- [30] A. L. Rosa, «LPWAN com base de comunicaciones para IoT,» 20 Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://pandorafms.com/blog/es/que-es-lpwan/>. [Último acceso: 2 Abril 2021].
- [31] D. C. Cangrejo Aguirre y D. M. Hernández López, «Sistema de apoyo a la prevención del abigeato de ganado bovino utilizando tecnologías IoT y cloud,» Universidad Santo Tomás, 2019, 2019.
- [32] RF Wireless World, «RF Wireless World,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LoRa-vs-Zigbee.html>. [Último acceso: 19 Mayo 2021].
- [33] C. J. Benítez Silva, «Prototipo de collar de monitoreo para ganado usando tecnología LPWAN.,» 2019.
- [34] R. A. Jiménez Toledo, I. Argote Puetaman y C. Meza Báez, «Prototipo de sistema de vigilancia para fincas ganaderas como prevención al abigeato,» *UNIMAR* 32, vol. 1, n° 67, p. 15, 2014.
- [35] J. B. A. M. N. C. A. Salazar, «Methodology for easing the deployment of cattle raising georeferencing tracing technologies on Colombian Farms. Case Study.,» 2021. [En línea]. Available: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/57835/1650.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 31 01 2022].
- [36] F. E. GONZÁLEZ ESPINOZA, L. A. LINARES MANCÍA y E. A. MENDOZA VAQUERANO, «Evaluación del efecto de un sistema de enfriamiento sobre parámetros fisiológicos y productivos en ganado lechero de la zona costera paracentral de El Salvador,» UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, SAN SALVADOR, 2016.
- [37] «EL TERMÓMETRO INFRARROJO COMO ALTERNATIVA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA CORPORAL EN VACAS LECHERAS,» UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR, LIMA-PERÚ, 2020.
- [38] Aprendiendo Arduino, «Node-RED,» 5 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2020/03/05/que-es-node-red/>. [Último acceso: 7 Noviembre 2021].
- [39] L. Alliance, «A technical overview of LoRa and LoRaWAN,» Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>. [Último acceso: 14 Octubre 2021].

- [40] B. F. N. Ortíz, «Sistema de monitoreo de temperatura y posición para bovinos utilizando una red de comunicación LoRaWAN,» Bogotá, 2021.
- [41] Instituto Colombiano Agropecuario, «RESOLUCION No. 002341,» 23 Agosto 2007. [En línea]. Available: <https://www.ica.gov.co/getattachment/0b5de556-cb4a-43a8-a27a-cd9a2064b1ab/2341.aspx>. [Último acceso: 1 Marzo 2021].
- [42] F. E. I. X. D. Temple, «CONDUCTA DE DESCANSO Y EFICIENCIA PRODUCTIVA DE LAS VACAS DE LECHE - UNA VISIÓN PRÁCTICA,» Enero 2016. [En línea]. Available: <https://www.fawec.org/es/documentos-tecnicos-vacuno/194-descanso-eficiencia-productiva-vacas>. [Último acceso: 14 Octubre 2021].
- [43] C. M. P. S. R. Vergara, «Implementación de proceso analítico jerarquico AHP para la toma de decisiones en la gestión de abastecimiento; aplicación a una empresa productora de queso costeño.,» 2018.
- [44] The 3D printing solutions company, «ABS M30 Production-Grade Thermoplastic for FDM 3D printers,» stratasys.
- [45] Fused Form, «Impresoras 3D para creación de prototipos, fabricación educación».
- [46] STRATASYS , «Fortus 380mc and 450mc,» 2016.
- [47] Sneyder, «¿CÓMO CALCULAR LA DISTANCIA ENTRE DOS PUNTOS GEOGRÁFICOS UTILIZANDO PYTHON?,» Python, 11 Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://pythoninicios.blogspot.com/2016/03/como-calcular-la-distancia-entre-dos.html>. [Último acceso: 11 Octubre 2021].
- [48] «NetQuest,» [En línea]. Available: <https://www.netquest.com/es/calculadora-tamano-muestra>.
- [49] Microsoft, «Microsoft - Power BI,» [En línea]. Available: <https://powerbi.microsoft.com/es-es/what-is-power-bi/>. [Último acceso: 2022].
- [50] Ayuda de Google Maps, «¿Cómo encontrar y mejorar la precisión de tu ubicación?,» [En línea]. Available: <https://support.google.com/maps/answer/2839911?hl=es-419&co=GENIE.Platform%3DAndroid>. [Último acceso: 2022].
- [51] «L80 GPS Module Presentation,» QUECTEL Build a Smarter World, 2015.
- [52] M. F. Yacuzi E., «QFD: Conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos,» Buenos Aires, 2003.
- [53] CEDAIT, «Costos de producción ganadería,» Medellín, 2021.
- [54] FEDEGAN, «Precio promedio de ganado gordo en pie Colombia (\$ x kilo) - Precio Referencia,» 2021.
- [55] Asocebú Colombia, «Brahman,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.asocebu.com/index.php/razas/brahman#:~:text=PAR%C3%81METROS%20EN%20BRAHMAN,toro%20es%20de%201000%20kg..> [Último acceso: 20 Noviembre 2021].

- [56] R. López, «Cálculos y análisis de indicadores de producción».
- [57] X. CARREIRA, «La voz de Galicia,» 24 Octubre 2014. [En línea]. Available: [https://www.lavozdegalicia.es/noticia/lugo/2014/10/24/movilizados-12-guardias-juicio-vacas-comen-pastos-ajenos/0003\\_201410L24C8991.htm](https://www.lavozdegalicia.es/noticia/lugo/2014/10/24/movilizados-12-guardias-juicio-vacas-comen-pastos-ajenos/0003_201410L24C8991.htm). [Último acceso: 2021].
- [58] FEDEGAN, «Estadísticas,» [En línea]. Available: <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/precios>. [Último acceso: 24 Noviembre 2021].
- [59] Y. A. Molina, S. Ramirez, G. Morales, M. Reyes, G. Sanchez y V. García, «Diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo remoto implementando internet de las cosas,» Research in Computing Science, México, 2020.
- [60] D. Evans, «Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG) Internet de las cosas Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo,» Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011.
- [61] D. Benitez Machado y C. Anias Calderon, «Propuesta de arquitectura para Internet de las Cosas,» Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba, 2016.
- [62] «Brahman,» Asocebú, [En línea]. Available: <https://www.asocebu.com/index.php/razas/brahman#:~:text=PAR%C3%81METROS%20EN%20BRAHMAN,toro%20es%20de%201000%20kg..> [Último acceso: 20 Noviembre 2021].