



Facultad de Ingeniería

MAESTRÍA INGENIERÍA INDUSTRIAL

Proyecto de Grado – Segundo Semestre 2021

Proyecto de grado en modalidad de aplicación

Modelo de analítica predictiva para el soporte de decisiones en la producción de leche cruda

Diego Fernández Castillo^{a,c}, Juliana Ochoa Bonet^{a,c},

José Fernando Jimenez Gordillo^{b,c}

^aEstudiante de la Maestría en Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen de diseño en Ingeniería

El aumento de la demanda de productos de consumo masivo derivados de la producción del sector pecuario ha incrementado significativamente el impacto que genera este sector en la economía colombiana. Según la Federación Colombiana de Ganaderos (Fedegan), el consumo de leche per cápita en Colombia es de 148 litros por año y el mercado de leche cruda es de 5,7 billones de pesos. Asimismo, se estima que existen 1,41 millones de cabezas de ganado dedicadas a la producción de leche, cifra que presenta una tendencia al crecimiento. Este comportamiento, evidencia la necesidad de emplear herramientas tecnológicas que apoyen el monitoreo de los animales y permita controlar la nutrición, enfermedades, distribución geográfica y ciclo de vida de los bovinos. Teniendo en cuenta esta premisa, este trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo analítico predictivo embebido en un sistema de monitoreo basado en tecnología de internet de las cosas (IoT), enfocado en la operación de producción de leche cruda de la Hacienda La Diana, ubicada en la Sabana de Bogotá. En específico, se construye un modelo analítico predictivo a partir de un sistema de monitoreo diseñado con sensores de georreferenciación, que permita predecir el comportamiento de los bovinos, en términos de: (a) enfermedades, (b) producción de leche y (c) clasificación. De modo que soporte a la administración en la detección temprana de enfermedades, la optimización en los tiempos de observación de los hatos, el aumento en el control de producción de leche cruda y facilite la distribución geográfica de los bovinos.

Palabras claves: Modelo de analítica, Sistema de monitoreo, Industria 4.0, Bovinos, Producción lechera, Sensor de georreferenciación, Ganadería, Mínimos cuadrados ordinarios.

1. Antecedentes

La existencia de un continuo crecimiento poblacional es la característica más importante en la historia de la humanidad. Esta expansión poblacional ha impactado en un crecimiento de demanda que ha repercutido en los niveles de producción de muchas industrias. Este es el caso del sector pecuario, el cual ha vivido un importante y continuo proceso de expansión, que involucra un incremento en el número de bovinos y animales para poder generar una mayor oferta. En este sentido, el monitoreo del ganado se ha transformado en un factor relevante para la productividad y control de este sector. A raíz de esta situación, se han desarrollado herramientas tecnológicas, con el propósito de monitorear y predecir el comportamiento del ganado. Y definitivamente este tema nunca ha sido indiferente en esta industria.

Tabla 1. Artículos sobre monitoreo en sector ganadero

Referencia	Objetivo	Metodología	Herramientas	Resultados
M. R. Borchers et al. (2016)	Evaluar las tecnologías lácteas de precisión disponibles comercialmente frente a las observaciones visuales directas.	Un grupo de vacas fueron equipadas con 6 tecnologías de acelerómetro triaxial diferentes evaluar el comportamiento de las vacas antes o durante el parto.	AfiAct Pedometer Plus, CowManager Sensor, CowAlert IceQube, Smartbow, Track A Cow	Se comprobó la precisión del monitoreo del comportamiento del ganado lechero.
J. P. Bikker et al. (2014)	Evaluar el acelerómetro basado en crotales SMARTBOW (Smartbow, Weibern, Austria) para detectar tiempos de rumia, ciclos de masticación y episodios de rumiación en vacas lecheras.	Los parámetros se determinaron mediante análisis de grabaciones de video como referencia y se compararon con los resultados del sistema acelerómetro.	SmartBow	Se verificó la efectividad de las observaciones por los usuarios vs. Grabaciones de video
Gerardo Caja et al. (2016)	Mejorar la rentabilidad del negocio	Implementar sensores para el desarrollo de "soluciones de detección" que recopilan datos automáticamente, como parámetros fisiológicos, medidas de producción y rasgos de comportamiento.	Milk SCC, Cow Manager, DaLaval BCS	Se logró los mejores estándares posibles de salud y bienestar animal, junto con un alto rendimiento de lactancia y un impacto ambiental mínimo.
M. Iwersen et al. (2018)	Evaluar el sensor (acelerómetro tridimensional) en cuanto a exactitud y precisión.	Analizar y comparar los resultados de las observaciones de los usuarios junto con los resultados del sensor.	Sensor; Agis Automa-tisering BV	Se verificó los resultados del sensor en las etapas "rumiando", "comiendo", "descansando" o "activos"

En 1991, Beauchemin estudiaba la importancia de los horarios de ordeño y los patrones de iluminación como criterios importantes de producción (Beauchemin, 1991). Por otro lado, Van Asseldonk et al., analiza el aumento del número de vacas por granja, situación que impulsa la reducción de tiempo invertido por agricultores en la administración de las vacas de forma individual. Lo que ha dado lugar a una tendencia por la necesidad de tecnologías que permitan una producción lechera de precisión, con el objetivo de apoyar la toma de decisiones, mejorar productividad y rentabilidad (Van Asseldonk et al., 1999). Estos incrementos de número de vacas por granja han desembocado en problemas de monitoreo y control de ganado. Müller y Schrader, exponen los beneficios que pueden brindar las innovaciones tecnológicas en el control del ganado con un monitoreo supervisado que no altere las condiciones naturales y el comportamiento de las vacas (Müller y Schrader, 2003). Este estudio fue complementado por Rutten et al., afirmando que monitorear la salud de la ubre, los eventos de celo, la salud de los pies y las piernas y la salud metabólica; brinda beneficios a los productores (Wathes et al., 2008; Rutten et al., 2013). Asimismo, la medición automática de la actividad de masticación y rumia puede permitir la detección temprana de deficiencia alimentarias y soporta las decisiones de las raciones (Zehner et al., 2012). Y es que en la industria siempre ha sido muy claro que las utilidades están directamente relacionadas con la calidad del forraje; por lo que la rumia es fundamental en la fisiología de los animales y se considera parámetro esencial para detectar enfermedades metabólicas o desequilibrio en la dieta del ganado (Borchers et al., 2016). Sin dejar de lado que esta actividad de rumia se ve influenciada por varios factores ambientales, la naturaleza y calidad del alimento (Metz 1975; Suzuki et al. 2014).

Para poder controlar esta importante actividad en los animales, se han desarrollado diversas tecnologías que permiten un monitoreo y control en tiempo real. Existen algunos dispositivos que controlan la actividad de la rumia a partir del sonido, registrando los sonidos de masticación (Beauchemin et al. 1989; Burfeind et al. 2011; Schirmann et al. 2009; Goldhawk et al. 2013; Ambriz Vilchis et al. 2015) mientras que otros miden los movimientos de la mandíbula (Kononoff et al. 2002; Umemura et al. 2009). Otro sistema consiste en mejorar el manejo del hato lechero, a partir de un acelerómetro tridimensional (SensOor; Agis Automa-tisering BV, Harmelen, Países Bajos), el cual se coloca en la etiqueta del oído; basado en el principio que involucra una relación directa entre el comportamiento y el movimiento del oído. Este modelo clasifica los datos del sensor como "rumiando", "comiendo", "descansando" o "activos". Similar a este sistema, el SMARTBOW Eartag

(Smartbow GmbH, Weibern, Austria) utilizado en este estudio se compone de un sensor de aceleración para reconocer la actividad de rumia, entre otros (Reiter et al., 2018). Estas innovaciones dan soporte y reemplazan la observación visual de la actividad de la rumia, lo cual es subjetivo y requiere de una fuerte mano de obra (Burfeind et al. 2011; Schirmann et al. 2009). Adicionalmente, brinda información en tiempo real y permite encontrar parámetros de comportamiento que se puede relacionar con condiciones que mejoran la productividad y salud del ganado. Y permite identificar puntos fuertes y débiles que afectan la producción, como el calor, estrés, enfermedades, calidad del forraje, clasificación del ganado y condiciones ambientales (Caja, Castro-Costa, & Knight, 2016).

Por otro lado, las condiciones climáticas se transforman en un aspecto fundamental para la industria, la cual tiene un desafío muy claro, que se resume en lograr los mejores estándares posibles de salud y bienestar animal, junto con un alto rendimiento de lactancia y un impacto ambiental mínimo. Debido a esto, Das contempló que los cambios ambientales aumentan o disminuyen la productividad y los aportes nutricionales del forraje; afectando directamente la calidad y los costos de la dieta de los bovinos (Das, 2018). Particularmente, el estudio documentó que los aumentos de temperatura limitan la energía disponible para las funciones productivas y reducen la fertilidad en el ganado lechero. Así pues, las condiciones climáticas y la madurez del forraje son elementos importantes para obtener un balance nutricional al menor costo.

Ahora bien, para controlar la estructura de costos, Matere se enfocó en el monitoreo de las condiciones del forraje, por medio de un balance hídrico y un modelo de simulación, con el objetivo de reducir la pérdida de ganado y mejorar la resiliencia (Matere et al., 2018). Por medio del modelo de monitoreo, se buscaba generar una alerta temprana y confiable, con el propósito de brindar un apoyo a la toma de decisiones proactivas y por consiguiente generar un sistema de prevención dentro de las decisiones del negocio. Además, en el 2015 Yan propone una herramienta de análisis y predicción para el rendimiento de la leche (PAT), contemplando el apoyo que brindaba el tratamiento de los datos con la metodología de regresión analítica, series de tiempo y machine learning con la intención de generar pronósticos y soluciones a problemas de productores de pequeña escala (Yan et al., 2015). Este estudio fue complementado por Righi en el 2019, con un modelo denominado MOOCARE, el cual utiliza tecnología de internet de las cosas; para asistir a los productores en el manejo del ganado lechero con el objetivo de pronosticar la producción de leche por bovino. En concreto, esta predicción permite realizar una planeación de la dieta de forma individual y sustentada en los niveles de producción (Righi et al., 2019).

Por último, el estado del arte deja un vacío en cuanto la implementación real de las diversas tecnologías para el monitoreo del ganado lechero en Colombia; sumado a esto se evidencia la dificultad para la disponibilidad y factibilidad de adquisición de esta tecnología para el sector pecuario colombiano. Asimismo, no se analizan modelos, soluciones o propuestas que contemplen el impacto de esta industria en el medio ambiente y existe ausencia de documentación sobre el nivel de contaminación que se produce por bovino y según los rendimientos de producción en el caso de la ganadería lechera.

2. Justificación y planteamiento del problema

A nivel mundial, la ganadería es una actividad relevante para la economía ya que proporciona materia prima esencial para la industria de alimentos. Sin embargo, existe una brecha importante en términos de los niveles de producción global. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization - FAO), los rendimientos de producción de leche medios varían ampliamente entre países, debido principalmente a las diferencias en los sistemas de producción, es decir, la nutrición de los animales, la raza de la vaca y los cuidados del animal se convierten en variables directamente relacionadas con la productividad. En países como Afganistán, el rendimiento promedio de leche de vaca es menor o igual a 500 kilogramos por año. En países con sectores lecheros en desarrollo, como Perú, el rendimiento promedio de leche de vaca es superior a 2000 kilogramos por año. Asimismo, los principales productores de leche de vaca son: Estados Unidos, India y China; mientras que los países con más ganado lechero son la India, Brasil, China, Etiopía y Pakistán (FAO, 2020). En la actualidad, se pronostica que para el año 2050 la economía mundial deberá aumentar la producción de alimentos en un 70% comparada con la producción en el año 2005 (FAO. 2018). Particularmente, Colombia puede ser uno de los países llamados a ofrecer parte de esta comida y el sector lácteo puede participar de este crecimiento, si se tiene en cuenta el potencial que se deriva de la funcionalidad y sostenibilidad de la operación pecuaria colombiana, con 40

millones de hectáreas en frontera agrícola y 28 millones de hectáreas aptas para producción de leche (UPRA,2020). Estos recursos han impulsado que en la última década existiera una fuerte expansión del número de ganado por operación de producción de leche cruda, con el propósito de generar más oferta y conseguir maximizar los beneficios a partir de un incremento de la producción de leche cruda (Fedegan, 2018). Sin embargo, incrementar la producción a partir de un aumento de mercado no garantiza rentabilidad; escenario que se presenta constantemente en la industria pecuaria, debido a los múltiples factores, como lo son: (a) composición de la dieta, (b) conformación de los hatos, (c) enfermedades, (d) genética e inseminación artificial, (e) impacto ambiental en la calidad del forraje y (f) rentabilidad del negocio; los cuales afectan la producción y el precio de la leche.

Este comportamiento de la industria ha generado nuevas formas de planear y monitorear la producción, con miras a poder regular el comportamiento, la nutrición y las condiciones de los bovinos en pro de conseguir un sistema productivo sostenible y rentable. Para entender un poco mejor este escenario, se debe contemplar la actualidad mundial del monitoreo de ganado, el cual muestra importantes avances enfocados en predecir y desarrollar patrones que permiten tomar decisiones en tiempo real, sustentadas en la información generada por estos ecosistemas tecnológicos (*Tabla 2.*)

Tabla 2. Principales sistemas de monitoreo a nivel mundial.

País	Monitoreo	Software
Alemania	Controla el consumo individual de cada bovino en tiempo real, a través de una etiqueta instalada en la oreja del animal.	GrowSafe
Alemania	Sistema patentado que asigna los siguientes estados de los bovinos a partir de un sensor en el oído, (a) rumiando, (b) comiendo, (c) descansando o (d) activo; para analizar la salud y productividad del ganado.	Cow Manager
Estados Unidos	Se centra en la detección temprana de enfermedades. Este sistema se alimenta de la información proporcionada por sensores con el objetivo de minimizar la pérdida de animales.	Quantified AG
Estados Unidos	Se enfoca en el control de enfermedades específicas en los terneros por medio de un dispositivo que controla la frecuencia en la alimentación, cambios en los patrones y genera un mapa detallado de la ubicación en la que se encuentran.	Precision Animal Solutions - REDI
Estados Unidos	Este sistema tradicional consolida la información de todo el ganado para generares bases de datos y con esto verificar la calidad, manejo y seguridad del resultado de la producción.	Southfork Solutions
Israel	Es un dispositivo desarrollado por la empresa SCR que se instala en los bovinos y permite monitorear la rumia o el celo de los animales; con el objetivo de medir el comportamiento y producción para tomar decisiones de negocio, como la conformación de hatos.	Heatime
Argentina	Es un ecosistema tecnológico de control agro- ganadero, que busca conocer y predecir el comportamiento del ganado, geolocalización y optimizar los recursos a partir de sensores. Adicionalmente, cuenta con la capacidad de conectar la comunidad que emplea este sistema para solucionar dudas.	Caravan Tech

En este punto es evidente la importancia de concebir una visión general del sistema de producción de leche cruda, para poder integrar todos los factores que afectan la rentabilidad. En Colombia, el sector agropecuario aporta el 6% del PIB nacional, y en específico, la ganadería contribuye con el 1,4% y genera 6% del empleo a nivel nacional (FEDEGAN, 2018). Esta operación posiciona el hato bovino colombiano en el número 12 a nivel mundial, 5 de América y 4 de Latinoamérica, después de Brasil, México y Argentina (FEDEGAN,2018). Según Fedegan, esta dinámica creciente en la producción ha sido apalancada con el enfoque en las buenas prácticas ganaderas en la nutrición, manejo del ganado y mejoras genéticas. Sin embargo, la ausencia de tecnologías de monitoreo es fuerte, a pesar de que existen estudios relacionados con desarrollo de modelos de supervisión para la producción de leche cruda colombiana, no se encuentra documentación de la aplicación real de las metodologías. En este sentido, las innovaciones de la ganadería colombiana se sustentan en unir los

conocimientos empíricos y explícitos, y no se enfocan en la oportunidad de aplicación de herramientas de la industria 4.0 para apalancar la productividad de este sector.

Según la literatura revisada, los principales desafíos de la industria pecuaria son: (a) nutrición, (b) distribución y espacio, (c) control de enfermedades y lesiones, (d) control del ganado y administración del tiempo, (e) genética y gestión de ciclo productivo de los bovinos, (f) mitigación del impacto de las condiciones climáticas y (g) rentabilidad del negocio (*Tabla 3.*).

Tabla 3. Principales desafíos de la industria pecuaria

Desafío	Definición
Nutrición	La dieta constituye entre el 60% y 70% de los costos totales de producción y tiene una relación directa con la productividad. En este sentido, las decisiones sobre la calidad y los componentes de la dieta se transforman en los atributos más importantes en temas de rentabilidad y costos (FAO, 2018). La dieta de los bovinos está conformada por forraje, concentrado, agua, sal, vitaminas y minerales.
Distribución y Espacio	Controlar la aglomeración de los animales es una actividad esencial para planear los movimientos de ganado dentro del lote, el diseño de los potreros, el pastoreo extensivo y medir el aforo (cantidad de kilogramo de forraje en un metro cuadrado). Estos factores son esenciales y afectan directamente los niveles de producción de los bovinos y los costos de producción.
Control de enfermedades y lesiones	Los bovinos caracterizados por un alto nivel de producción tienden a tener mayor susceptibilidad al estrés por calor, enfermedades infecciosas (mastitis, metritis) y problemas metabólicos (cetosis, acidosis, hipocalcemia). Por esta razón, la detección temprana y el control de enfermedades es fundamental para mantener la salud y producción de la ganadería lechera. Asimismo, para prevenir complicaciones y pérdida prematura de ganado.
Control del ganado y administración del tiempo	Vigilar de forma constante el estado de salud, producción y comportamiento del ganado se ha transformado en un reto para esta industria, debido al incremento de los tamaños de los hatos y los costos de la mano de obra. Esta situación ocasiona descuido en el control de los niveles de producción por animal, mal manejo de los hatos, incremento en el tiempo de trabajo y costos.
Genética y gestión de ciclo productivo de los bovinos	Controlar y planificar el ciclo productivo de los animales permite regular la producción, evitar enfermedades y problemas de gestación. Sin embargo, no se puede concebir este ciclo productivo sin la genética propia de cada bovino. Esta relación va a repercutir directamente con los niveles de rendimiento del ganado y sus generaciones futuras. Por lo que controlar la historia genética y productiva del ganado se convierte en un factor determinante para la conformación de los hatos y las decisiones de ventas.
Mitigación del impacto de las condiciones climáticas	Las condiciones climáticas son un parámetro que afecta directamente la estructura de costos y rentabilidad de esta industria, debido a la implicación con enfermedades por fuertes cambios de temperatura y el impacto que genera en las propiedades nutricionales del forraje. Teniendo en cuenta que el manejo de los forrajes repercute directamente en los costos de producción, al convertirse en el principal recurso que posee la ganadería y los animales para cubrir sus requerimientos nutricionales y energéticos.
Rentabilidad del negocio	El precio de la leche depende del porcentaje de grasa, proteína y lactosa, y se establece según la resolución 017 del Ministerio de Agricultura. Esta parametrización genera que la calidad sea un factor determinante en pro de maximizar los beneficios, en conjunto con un riguroso control en la estructura de costos que permita generar los niveles de rentabilidad esperados. Por otro lado, se debe considerar que esta industria depende de varias variables estocásticas, como el clima, la calidad de la leche, enfermedades y problemas de seguridad, por lo que la planificación y administración adecuada conforman los pilares para mantener un sistema productivo rentable y sostenible.

Ahora bien, si a estos escenarios le agregamos el contexto actual y atípico que vive la humanidad y en específico Colombia, generado por el Covid-19, el monitoreo del ganado se convierte en una actividad con una buena proyección en el mercado global (STATISTA, 2020), y en una actividad fundamental para poder controlar y soportar la toma de decisiones que apoyan la productividad, mitiguen problemas de seguridad, nutrición, salud y promuevan el control de los bovinos en tiempo real en la ganadería colombiana.

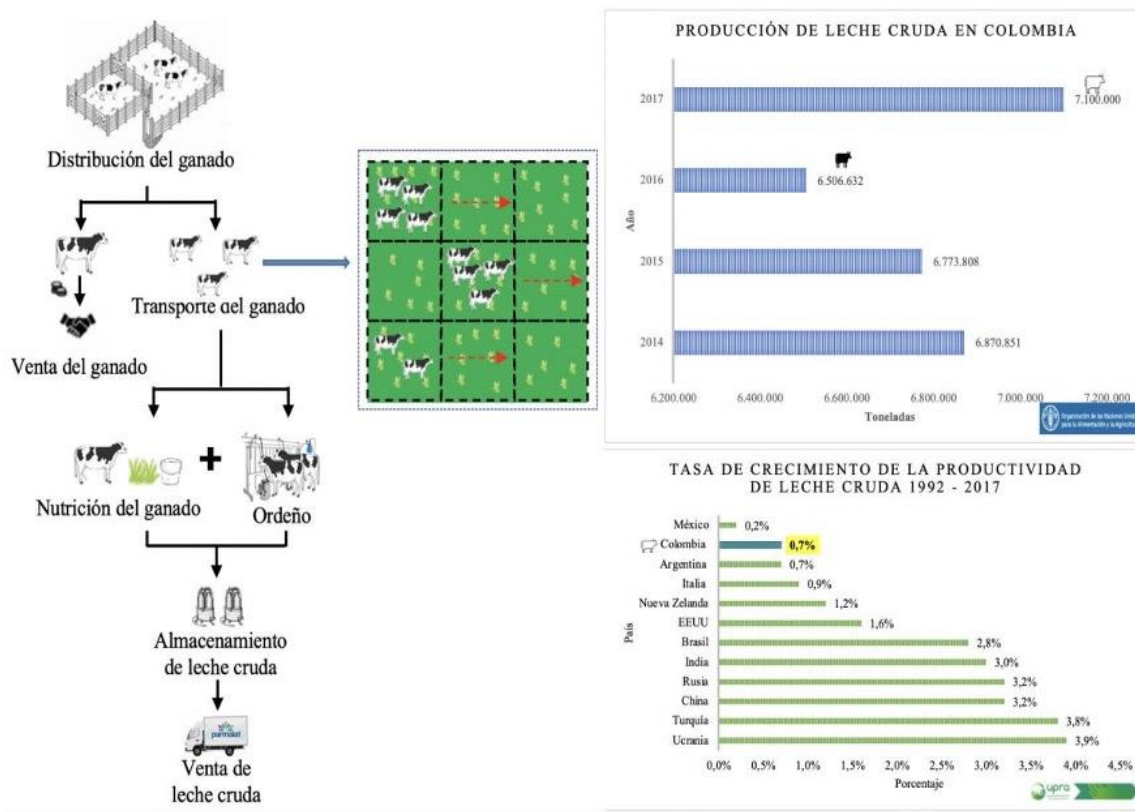


Figura 1. Proceso de producción de leche cruda (Diseño propio), Producción de leche en Colombia y Tasa de crecimiento de la productividad de leche cruda, construido con información de UPRA y FAO.

Teniendo en cuenta el contexto de la industria y la situación que nace a partir de esta coyuntura, la cual ha desembocado en la mayor recesión económica de la historia desde la “gran depresión de 1929” (BBC, 2020), ocasionando cambios de comportamiento del consumidor y productor sin precedentes; y creando un desafío para todas las industrias. El mensaje es claro, si las industrias no se adaptan, desaparecen y sino actúan retroceden. El sector pecuario, no puede esquivar esta crisis y a pesar de ser uno de los sectores que no paro su producción, no presentó la misma disponibilidad y administración por parte de los gerentes del negocio.

En este punto, el desafío del sector pecuario se puede resumir en lograr los mejores estándares posibles de salud y bienestar animal, junto con un alto rendimiento de lactancia y un impacto ambiental mínimo apoyado con herramientas tecnológicas que impulsen el monitoreo y control del negocio. Este proyecto se enfocará en analizar el primer eslabón del proceso de producción de la ganadería lechera, para dar respuesta a la siguiente pregunta: *¿Cómo se podría mejorar la productividad en un sistema de producción de leche cruda colombiano, a partir del desarrollo de un modelo analítico predictivo embebido en un sistema de monitoreo basado en tecnología de internet de las cosas?*

A continuación, se especifica a que se refieren los términos incluidos dentro de la pregunta de investigación para la ejecución de este proyecto.

- **Producción de leche cruda:** Primer eslabón del sistema de producción de leche cruda, que llega hasta la etapa de almacenamiento y conservación del resultado de esta operación en tanques fríos.
- **Modelo analítico predictivo:** Existe la opción de aplicar algoritmos supervisados, para generar aprendizaje en pro de realizar predicciones o clasificaciones. Algoritmos no supervisados para identificar relaciones que desemboquen en agrupaciones, asociaciones o nuevos conocimientos. O aplicaciones de Machine Learning, para las predicciones.

- **Sistema de monitoreo:** Captar la información de los nodos (bovinos) mediante la aplicación de la industria 4.0, con la intención de controlar aspectos físicos. En específico la ubicación geográfica y movimientos del animal.
- **Tecnología de internet de las cosas:** IoT (Internet de las Cosas) hace referencia a los dispositivos conectados a Internet, con el propósito de compartir datos, por medio de la utilización de sensores integrados en pro de reunir y generar información. En este caso en específico, se busca hacer uso de sensores de georreferenciación, para generar información de ubicación geográfica y recorrido de los bovinos.

3. Coherencia con temáticas de la maestría

Este apartado hace referencia a la relación que tiene este proyecto con la maestría en Ingeniería Industrial, donde se expone claramente las habilidades de investigación, el análisis de los procesos con un enfoque de maximización de beneficios. Además, las facultades para resolver problemas y diseñar nuevas soluciones, como la construcción del sensor para el sistema de monitoreo, en conjunto con el desarrollo del modelo analítico para el análisis de la información.

4. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un modelo analítico predictivo embebido en un sistema de monitoreo fundamentado en la operación de producción de leche cruda colombiana, que permita mejorar la productividad de la operación de la Hacienda La Diana.

Objetivos Específicos

1. Realizar la caracterización del proceso de pastoreo y ordeño en el sector pecuario en Colombia, analizando la operación de la producción de leche cruda e identificando los puntos potenciales de mejora con la integración de tecnologías de georreferenciación.
2. Diseñar la arquitectura de control de un sistema de monitoreo para la hacienda La Diana, que permita capturar los datos de análisis de movimiento, integrar un modelo de analítica predictiva por realizar y soporte las decisiones operativas en la administración de la hacienda.
3. Desarrollar un modelo analítico predictivo para la producción de la leche basado en la información generada por los sensores de georreferenciación que componen el sistema de monitoreo.
4. Realizar una prueba de usabilidad y funcionalidad de concepto del sistema de control propuesto.
5. Medir el impacto operativo del sistema de control propuesto, comparado frente a la situación operacional de la hacienda actualmente.

5. Desarrollo de la metodología

Para el desarrollo del proyecto se realiza un capítulo por cada objetivo específico, con el fin de presentar el proceso de forma ordenada y concisa.

El desarrollo de este estudio de tesis se divide en 4 etapas. (1) Aprendizaje, la cual consiste en la investigación y consolidación de la información, en términos del sistema de producción de leche cruda de la Hacienda La Diana y la tecnología disponible para la integración de la industria 4.0 en el sector pecuario colombiano. (2) Desarrollo, radica en la construcción del sistema de monitoreo sustentado en el sistema productivo de la Hacienda La Diana, teniendo en cuenta los requerimientos definidos en la primera etapa. (3) Analítica, en esta etapa se emplea la metodología CRISP-DM, a partir de un análisis matemático, estadístico y algorítmico de los datos recopilados, para la toma de decisiones estratégica. (4) Validación, por último, se analizan los resultados y se mide el impacto operacional que se genera en la Hacienda La Diana con esta implementación (*Figura 2.*).

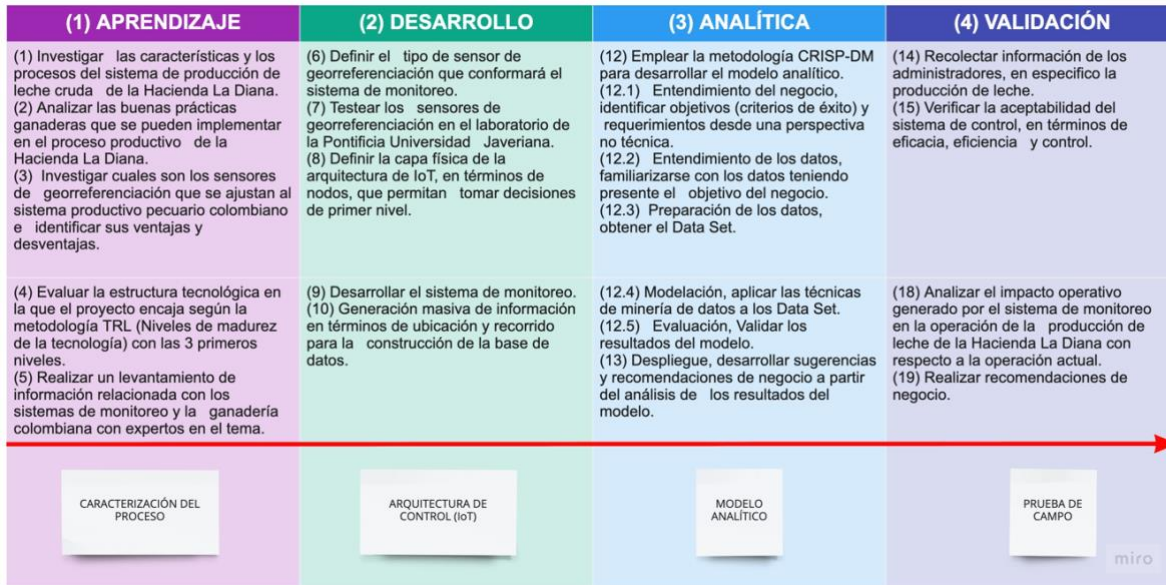


Figura 2. Metodología del proyecto

5.1. Etapa 1 - Aprendizaje

Esta sección se divide en dos partes, la primera hace referencia a la caracterización del proceso, y la segunda se enfoca en la selección de los sensores para la ejecución del sistema de monitoreo.

5.1.1 Caracterización del proceso

La Hacienda La Diana se caracteriza por tener un sistema de producción de leche cruda ubicada en el municipio de Madrid, Cundinamarca, con una extensión de 70 fanegadas, que albergan 163 cabezas de ganado de razas Holstein y Jersey, divididas en grupos. Los cuales, en el contexto de negocio son nombrados como “Hatos”, “Horros” y “Próximas”, dependiendo de sus características. El proceso de extracción de leche es ejecutado por 4 trabajadores que se encargan de arrear, controlar, alimentar y ordeñar al ganado (*Diagrama 1.*).

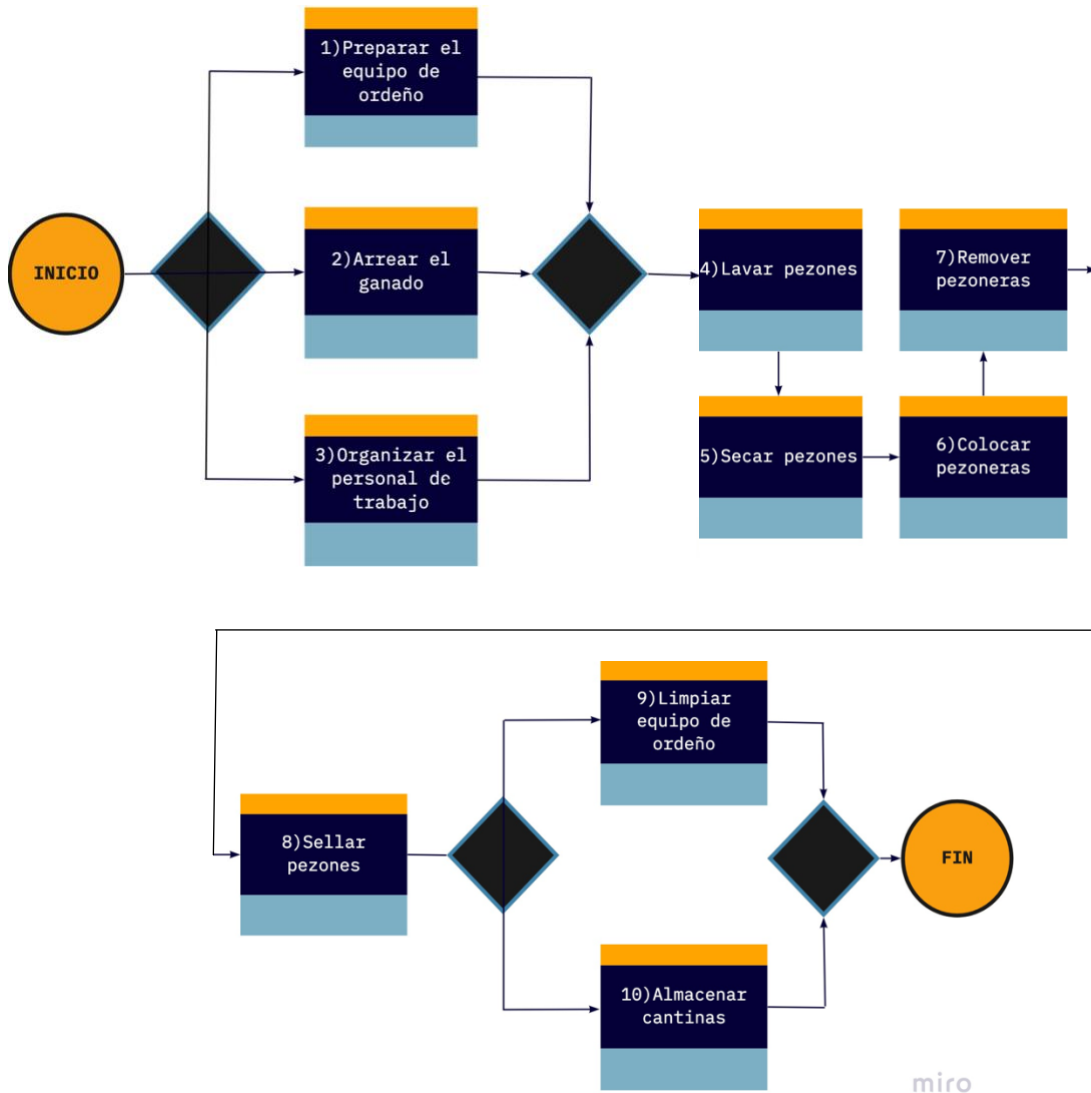


Diagrama 1. Diagrama de flujo del proceso de ordeño

A continuación, se encuentra el detalle de las actividades.

1. Preparación del equipo de ordeño: Se realiza el lavado correspondiente de todas las piezas que componen el equipo, para posteriormente, armar las máquinas de ordeño. Asimismo, se debe tener listas las cantinas, telas, pezoneras y otros implementos para el proceso.
2. Arrear el hato: Consiste en desplazar el ganado de un lote a otro para ubicarlas de manera organizada en las máquinas de ordeño.
3. Organización del Personal: Los trabajadores se ubican en las instalaciones según su tarea, es decir, 2 trabajadores encargados del ordeño deben tener las manos limpias y deben estar ubicados dentro de los equipos de ordeño, 1 trabajador está encargado de mantener al hato controlado y de su distribución hacia las máquinas de ordeño; y finalmente, hay 1 trabajador encargado de servir el concentrado con el objetivo de que la vaca entre a la máquina de forma pasiva y sin ocasionar ningún tipo de maltrato. Además, este último, apoya a controlar el ganado y organizar las cantinas de leche en un camión para transportarlo al lugar de almacenamiento.
4. Proceso ordeño: Los 2 ordeñadores deben ejecutar las siguientes tareas.
 - a. Lavar pezones: Es fundamental lavar los pezones de las vacas con agua tibia y un desinfectante suave para mantener la higiene, puesto que, esto reduce el número de bacterias y evita contaminación de la leche.

- b. Secar pezones: Con un trozo de papel desechable por pezón se realiza el proceso de secado.
 - c. Colocar pezoneras: Se colocan las pezoneras por un tiempo máximo de 4 o 5 minutos por vaca. Sin embargo, se presentan ocasiones en las que hay vacas que no producen muchos litros de leche por lo que no se debe dejar puestas las pezoneras por mucho tiempo después de que la vaca ya no esté dando más leche, ya que puede ocasionar enfermedades, como mastitis.
 - d. Remover las pezoneras: Se debe cerrar el vacío antes de retirar las pezoneras para evitar maltrato en el pezón e infecciones.
 - e. Sellar pezones: Consiste en sumergir los pezones en un desinfectante al menos 30 segundos.
5. Limpieza del equipo de ordeño: Se desinstala el equipo de ordeño y todos los elementos se lavan con agua y sus desinfectantes correspondientes. Después el equipo de ordeño es almacenado en la bodega.
 6. Cantinas: Las cantinas son almacenadas en agua fría con el objetivo de mantener la leche cruda en un estado óptimo hasta su venta.

Ahora bien, es importante introducir el concepto de “Buenas Prácticas Ganaderas” (BPG), las cuales, son un conjunto de acciones que permiten controlar y regular la operación para garantizar la rentabilidad del negocio. Según el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) es fundamental estudiar los siguientes puntos.

- Higiene en el ordeño: El proceso de recolección de leche cruda debe garantizar un equipo apropiado debido a que la gestión del ordeño debe estar dirigida a la minimización de la contaminación microbiana, química y física. Para cumplir con estos estándares se debe tener en cuenta el desarrollo del proceso, el almacenamiento e higiene de los equipos de ordeño, mantener tanto los elementos de las máquinas como los utensilios utilizados en el proceso aseados y desinfectados, asegurarse del almacenamiento de la leche cruda una vez envasada en las cantinas, y realizar la categorización del hato con el propósito de segmentar los animales enfermos.
- Instalaciones y áreas de producción primaria: Para mitigar la contaminación de la leche se debe contar con el diseño y construcción de las instalaciones dentro del predio. Es decir, el predio debe estar debidamente delimitado ya sea con cercas, broches, puertas, entre otros; los corrales deben ser aptos para el paso de los animales con el objetivo de garantizar su seguridad y la de los trabajadores. Asimismo, el predio debe contar con un cuarto de almacenamiento de los insumos.
- Plan de saneamiento: El proceso de producir leche cruda trae muchos factores de contaminación, por lo cual este proceso debe ser gestionado para mantener un equilibrio con el medio ambiente. Este equilibrio se puede garantizar con un plan sanitario elaborado y aprobado por un médico veterinario que brinde los tratamientos y medicamentos que se deben aplicar a los animales para evitar y prevenir cualquier enfermedad.
- Buenas prácticas en la alimentación – BPAA: La dieta suministrada al ganado debe ser planeada todos los meses y debe contener alimentos de buena calidad para garantizar la inocuidad de los alimentos de origen animal para consumo humano. Además, el agua debe ser de calidad para el consumo de los animales y que no representen ningún riesgo para la salud de los animales, la carne y la leche.
- Bienestar animal y personal: Se debe asegurar que los animales no sufran de hambre, sed, desnutrición, dolor, lesiones ni enfermedades; que los animales no sufran de molestias físicas y térmicas; y que los animales se encuentren libres de temor y angustia.

Finalmente, como se menciona anteriormente existen varios desafíos que se deben tener en cuenta para mantener una buena producción de leche cruda. Para el desarrollo de este proyecto se realizaron estudios junto con la ayuda de COBINAGA con el propósito de definir las variables a monitorear que nos brinden la información necesaria y así obtener una herramienta que apoye la toma de decisiones y por consiguiente mejore la productividad de la operación de la Hacienda La Diana. Dicho esto, se encuentra que el gasto energético es uno de los factores más importantes, puesto que este influye exclusivamente en el desarrollo y producción del animal; las vacas requieren de energía para su reproducción, producción y mantener unos estándares en la calidad de la leche (Yasohtai, 2014). Ahora bien, uno de los factores más relevantes al momento de estudiar el gasto energético consiste en controlar los desplazamientos de los bovinos, puesto que este factor es una de las actividades que se puede intervenir con la planeación de la operación. No obstante, todas las características de los bovinos se podrían manejar como una variable de estudio. Las condiciones del bovino como la temperatura, el ciclo productivo, la edad, la genética y en general toda la trazabilidad del animal, se convierten en factores importantes al momento de explicar los niveles de producción. Sin embargo, este proyecto estudia los

desplazamientos de los bovinos con el propósito de encontrar una relación con la productividad de la industria y teniendo en cuenta la complejidad que representa monitorear factores internos y externos del animal.

5.1.2 Dispositivos – Sensores de georreferenciación

En este punto, se evidencia que la clave para obtener un sistema de producción de leche cruda eficiente es garantizar las condiciones de higiene y bienestar de los bovinos, seguido por un organizado plan nutricional que permita maximizar los niveles de producción. Sin embargo, no se puede contemplar estos niveles de productividad sin un sistema de monitoreo que permita administrar y controlar el negocio, en términos de número de ganado, control de enfermedades y ciclo productivo del animal. Por esta razón, se realizó la investigación de sistemas de monitoreo y tecnologías de georreferenciación que se ajustan al sistema productivo pecuario colombiano, los cuales fueron evaluados en términos de factibilidad, precio, cobertura y usabilidad; donde 1 es la menor calificación y 5 la mayor (Tabla 4.). A partir de este análisis, se toma la decisión de implementar un sensor conformado por un Raspberry más un GPS.

Tabla 4. Matriz MCDA Sensores

Sensor	Factibilidad	Precio	Cobertura	Usabilidad
<i>Digitanimal</i>	1	1	5	5
<i>GPS Animal Cow</i>	1	5	5	4
<i>Tracki</i>	3	1	4	5
<i>Akitoy App</i>	4	3	2	1
<i>SmartWatch</i>	1	4	2	1
<i>Raspberry + GPS</i>	5	5	3	4

Por otro lado, en la investigación se evidencia que existe una limitación fuerte en términos de cobertura de los sensores de georreferenciación para Colombia y otros países de Latinoamérica. Seguido por los altos costos de los sensores, software e implementación para poner en marcha estas herramientas en la ganadería colombiana. Puesto que, estos sensores necesitan una red móvil, wifi y antenas que permitan conectar la señal de los dispositivos, seguido por una infraestructura adecuada para el mantenimiento y almacenamiento de los datos. En conclusión, este sector presenta una gran limitación para la adquisición e implementación de estas tecnologías.

Finalmente, se hace uso de la metodología TRL la cual es una herramienta que mide los indicadores de madurez de un proyecto. Dicha metodología cuenta con 9 niveles de madurez (Figura 3.), los cuales se dividen en tres entornos, (1) Entorno de laboratorio, (2) Entorno de simulación, y por último (3) Entorno real. Este proyecto cumple las características del nivel 3, es decir, se desarrolla la idea, se genera la investigación, se realizan estudios analíticos y se realizan las pruebas a nivel laboratorio para validar físicamente las predicciones.



Figura 3. Niveles de la metodología TRL, Tomado del estudio TECHNOLOGY READINESS LEVELS – TRL.

5.2. Etapa 2 – Desarrollo: Arquitectura de control del Sistema de monitoreo

A partir de la complejidad que representa la implementación de sistemas de monitoreo animal existentes en el mercado, se toma la decisión de desarrollar una solución diferente para el control del ganado en la Hacienda La Diana. En resumen, se construye un sensor, utilizando el módulo GPS con Raspberry para generar la base de datos de coordenadas, fundamentado en una programación ejecutada en la herramienta Python. A continuación, se detalla los pasos y elementos necesarios para construir el sensor.

1. Definir el hardware, es decir, el conjunto de elementos físicos que constituyen el sistema informativo, el dispositivo de monitoreo.
 - a. Raspberry Pi 3+: Ordenador de placa única (SBC) de bajo costo, la cual posee la capacidad de funcionar como una computadora personal y completa. Cuenta con un procesador ARM Cortex a 1.4Ghz con 1 GB de Ram, Wifi, BLE y Ethernet.



Figura 4. Raspberry Pi 3.

- b. Neo 6M : GPS excelente por su precisión y costo beneficio. Se comunica a través de un puerto serial UART y es de tamaño reducido lo cual se ajusta perfecto a las condiciones de su uso. Mide parámetros de Latitud y Longitud con un sesgo de hasta 3 metros.



Figura 5. GPS Neo 6M.

2. Conectar los cables siguiendo el orden que muestra la imagen. Esto con el fin de enviar los datos del Raspberry Pi 3+ a través de la conexión serial.

```
Neo 6M VCC ----> Raspberry pi 5v
Neo 6M GND ----> Raspberry pi GND
Neo 6M RX ----> Raspberry pi TX (gpio 14) //Not required in our case
Neo 6M TX ----> Raspberry pi RX (gpio 15)
```

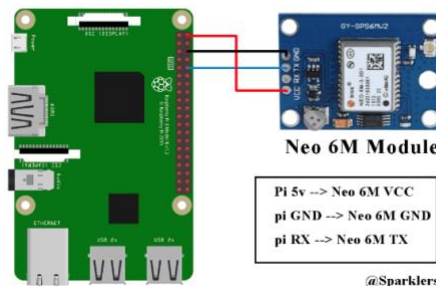


Figura 6. Conexión Raspberry, tomado de Sparklers.

3. Conectar el sensor a una batería con capacidad mínima de 10000 mAh, puerto de entrada USB 5V – 1.5ª y puerto de salida USB A QC 3.0: 5V 3A.



Figura 7. Batería Brightside.

4. Obtener los datos del GPS Neo 6M mediante un software.
5. Configurar la consola para escribir el código en Python, seguido por la instalación de la librería “pynmea2”.

Se debe tener en cuenta que, para el desarrollo del código escrito en el sensor, el formato y lectura de los datos, se obtuvo una base de datos de la universidad de Nottingham proporcionados por la directora de investigación Milena Radenkovic. Estos datos hacen referencia a los resultados del monitoreo realizado en el estudio “Energy efficiency in the mobile ad hoc networking approach to monitoring farm animals” (Radenkovic, 2007). Asimismo, se realizó la programación del modelo base en el software Python.

Una vez construidos los sensores de georreferenciación, se procedió con los testeos de estos, por lo que se probaron en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana con el propósito de identificar su margen de error. Se realizó 1 día de pruebas y se encontró que el GPS Neo 6M cuenta con un margen de error de entre 0.5 y 3 metros, lo cual es coherente con las especificaciones del dispositivo, las cuales definen un margen de error de hasta 3 metros. Adicionalmente, se optó por realizar pruebas de campo en diferentes zonas de Bogotá para comprobar su funcionalidad, seguido por la última prueba del dispositivo en la ubicación de la Hacienda La Diana para garantizar que los sensores trabajen correctamente en Madrid, Cundinamarca. Las pruebas realizadas en la Hacienda permitieron identificar ausencias en el código, que posteriormente se solucionaron, las cuales hacen referencia a la fecha y hora del dato captado por el sensor y es útil para el registro de los datos y verificación de la operatividad (*Diagrama 2.*).

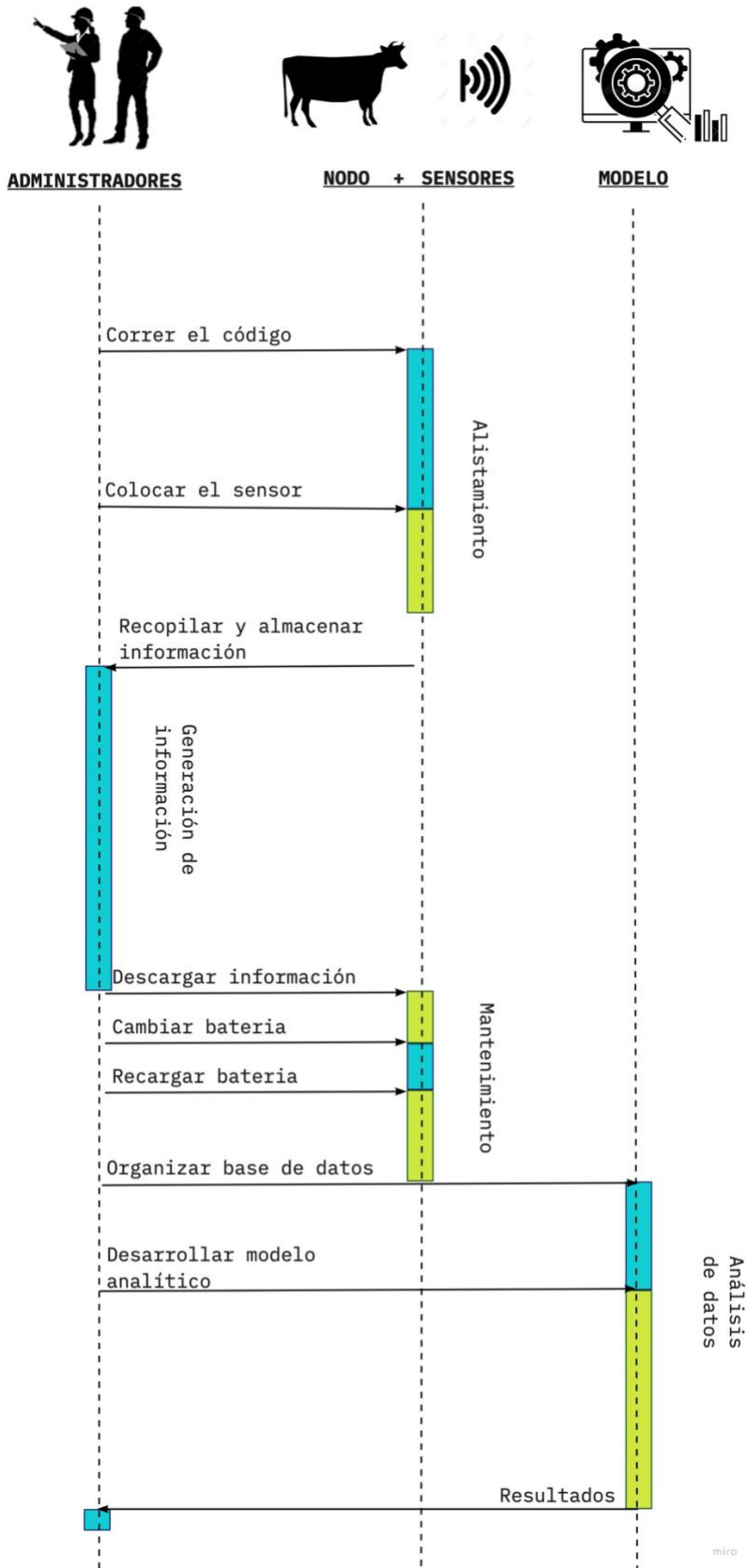


Diagrama 2. Diagrama UML del proceso de ordeño y sistema de monitoreo.

Ahora bien, para recopilar los datos es necesario considerar la interfaz que existe entre la información y el elemento utilizado para crearla y posteriormente almacenarla, procesarla y analizarla. A partir de este concepto, se comprende la arquitectura del sistema IoT, la cual está conformada por cuatro etapas principales: (1) Sensores y actuadores, (2) Pasarelas de internet y sistema de adquisición de datos, (3) Análisis en la frontera y (4) Análisis en profundidad en la nube o en el centro de los datos. En este punto, es importante destacar que para este proyecto el almacenamiento de los datos se realiza directamente en el dispositivo de georreferenciación y no se considera como alcance el uso de almacenamiento de la nube en la capa física de IoT, lo cual implica incluir un paso en el proceso de monitoreo, que consiste en descargar la información de los sensores. Teniendo en cuenta lo anterior, la arquitectura de IoT de este proyecto se encuentra en la *Figura 8* y se define por las etapas explicadas a continuación.

Fase 1. Sensores y actuadores El proceso comienza con los dispositivos que tienen como propósito monitorear y supervisar al nodo seleccionado, es decir, los sensores de georreferenciación capturan los datos del recorrido del animal durante un periodo determinado, junto con datos relevantes como lo es la fecha y hora.

Fase 2. Pasarelas de internet y sistema de adquisición de datos Se almacenan los datos recopilados por el dispositivo en una base de datos, convertido de un formato analógico a digital.

Fase 3. Análisis en la frontera El código ejecutado en Python nos permite organizar y procesar los datos capturados por el dispositivo, con el objetivo de proporcionar una base de datos con las latitudes y longitudes del animal, las cuales posteriormente serán analizadas para dar respuesta a una decisión.

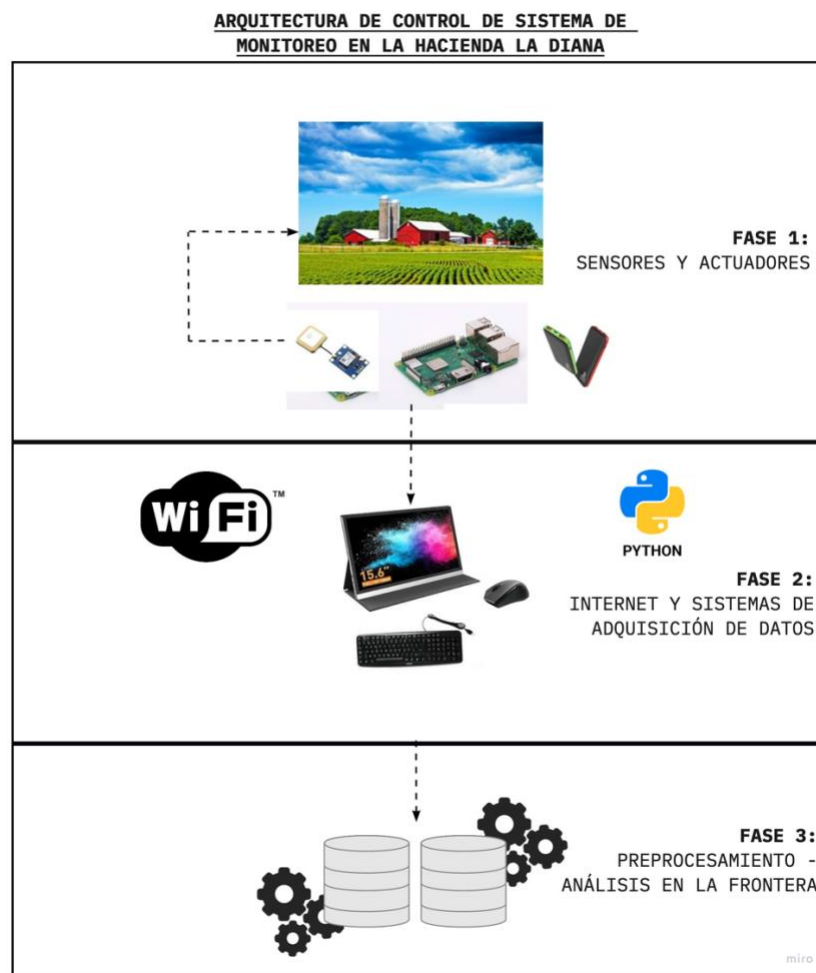


Figura 8. Arquitectura de control de sistema de monitoreo en la Hacienda La Diana.

En primera instancia, se realizó un estudio económico y logístico, con el objetivo de determinar la cantidad de nodos a utilizar, es decir, el número de vacas y sensores para la recolección de datos. El estudio económico se basó en estudiar los costos y presupuesto del equipo para la construcción de los sensores. Por otro lado, el estudio logístico se enfocó en analizar las vacas con producción promedio, alta y baja; esto con el propósito de analizar el comportamiento y tratar de hallar una relación de la producción de estos animales con la distancia recorrida de cada una de ellas en un mismo espacio. Ahora bien, se definen sensores que trabajan de forma directa, puesto que estos tienen como propósito monitorear y captar la distancia recorrida del animal en un espacio determinado dentro de la Hacienda La Diana. Además, se recopila la producción diaria del animal en estudio ya que posteriormente es una información necesaria para el modelo analítico y el análisis a realizar para el soporte de toma de decisiones.

En conclusión, el sistema de monitoreo busca apalancar los resultados a nivel operativo y estratégico. Para lo cual, se definen unas hipótesis del comportamiento y acciones de los actores involucrados en el negocio, en este caso las vacas, que en conjunto con la implementación del sistema de monitoreo busca verificar la validez de dichas hipótesis para finalmente proporcionar una herramienta que apoye la toma de decisiones. Por último, el propósito es maximizar la productividad y consecuentemente los beneficios del negocio, a partir del análisis arrojado por el sistema de monitoreo.

5.3. Etapa 3 - Analítica: Desarrollo del modelo analítico predictivo

A partir de la aplicación de la metodología de minería de datos CRISP DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining) y la técnica estadística regresión lineal, se desarrolla el modelo analítico predictivo. Este método permite orientar el trabajo de minería de datos, es decir, estudiar un proyecto estándar, al definir el ciclo de vida enfocado a la exploración y análisis de datos (Diagrama 3.).

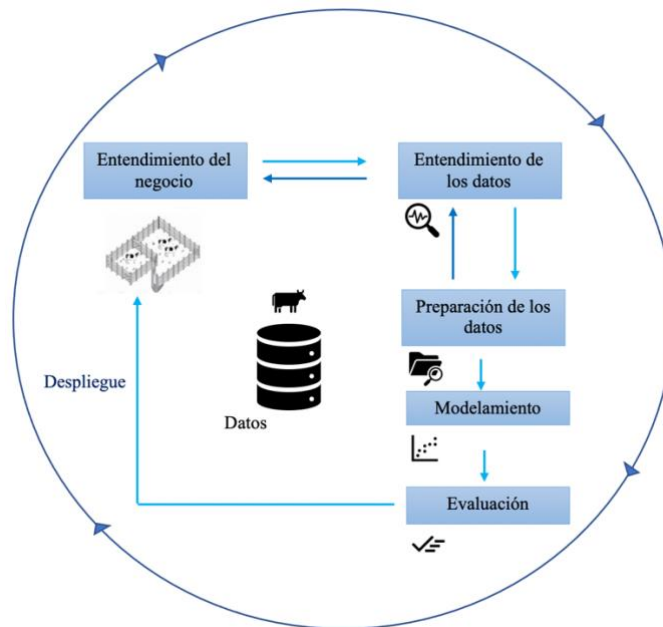


Diagrama 3. Metodología CRISP-DM.

Las fases que se tienen en cuenta para este proyecto son:

- a) **Entendimiento del negocio** Esta fase se enfoca en la comprensión de los objetivos del proyecto desde una perspectiva de negocio y entendimiento del contexto en el que se va a aplicar un análisis descriptivo y posteriormente, un modelo analítico.

- b) **Entendimiento de los datos** El objetivo es recopilar la información y familiarizarse con los datos a analizar, identificar las variables, la calidad de los datos, posibles errores, entre otros. En esta fase, la estadística descriptiva apoya el estudio del comportamiento de los datos.
- c) **Preparación de los datos** Se construye la base de datos final para la implementación del modelo analítico. Las tareas de preparación incluyen la selección de los datos, la limpieza de éstos, la construcción de nuevas variables si es necesario y la integración de los datos.
- d) **Modelación** Durante esta fase, se aplican las técnicas necesarias para la implementación del modelo analítico, se explica tanto el modelo como los resultados de este.
- e) **Evaluación** Se evalúa el modelo aplicado.

5.3.1 Entendimiento del negocio

Uno de los elementos claves de cualquier estrategia operacional en la industria pecuaria es controlar las condiciones del ganado para la administración de los recursos que permita tener ventajas competitivas en el entorno industrial. Ejemplos de esas ventajas pueden ser, una detección temprana de enfermedades lo que repercute en una reducción de costos o un producto de mayor calidad apalancado con la calidad del forraje y de la dieta de los bovinos.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la última década diversas organizaciones de la industria de alimentos, tecnología y bienestar han desarrollado nuevos modelos de negocio con el propósito de impulsar la rentabilidad y responder a las condiciones del mercado y las necesidades del cliente. La conclusión ha sido clara y directa, las organizaciones deben encontrar mecanismos de control que les permita emplear los recursos de la información que generan constantemente, con el propósito de impulsar pronósticos que sustenten niveles de producción y rentabilidad, a partir del soporte en las decisiones de la administración y la planificación estratégica.

Este estudio se enfoca en analizar la información de la distancia total recorrida del ganado y la producción de leche obtenida por 5 dispositivos de georreferenciación, en 21 días de toma de datos, con el objetivo de presentar un estudio que aplica la metodología de regresión lineal, de modo que se puedan observar principios de machine learning en tareas supervisadas.

5.3.2 Entendimiento de los datos

La base de datos generada por los 5 sensores cuenta con 52.391 registros, los cuales están constituidos por latitud, longitud, día y hora de la muestra, que expresan puntos de georreferenciación para posteriormente obtener la distancia total recorrida por el nodo durante un periodo determinado. En paralelo, se construyó una base de datos con dicha distancia recorrida y la producción de litros de leche por día de los 5 nodos durante 21 días de monitoreo en la Hacienda La Diana (*Diagrama 4*).

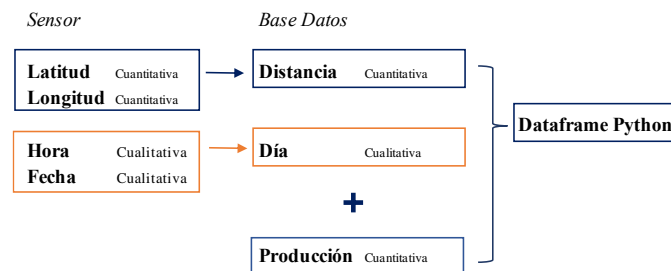


Diagrama 4. Composición base de datos Python.

Para el análisis del estudio se tienen dos variables cuantitativas, **Producción_{total}**, la variable dependiente (o de respuesta) y la **Distancia_{total}** la variable predictora (variable independiente). Como se observa en la *Tabla 5* las variables tienen 5 índices que hacen referencias a los 5 nodos “Cow” seleccionados en la investigación de

los cuales se analiza que la *Cow3* y la *Cow4* presentan una baja producción de litros de leche, la *Cow1* una producción promedio y los nodos *Cow2* y *Cow5* se caracterizan por una producción alta. Adicionalmente, se demuestra que la distancia recorrida individual se encuentra entre el rango de 2 a 5 km/día por vaca, lo que evidencia que tanto los animales dentro del estudio como el potrero en el que se encontraban, presentan diferentes características que afectan el comportamiento y por consiguiente el recorrido del animal.

Tabla 5. Variables cuantitativas del modelo analítico

Dia	Cow1		Cow2		Cow3		Cow4		Cow5	
	Distancia	Producción	Distancia	Producción	Distancia	Producción	Distancia	Producción	Distancia	Producción
1	2,27	10	2,48	16	3,84	7	4,30	4	2,86	16
2	4,89	8	2,29	16	3,72	8	3,64	8	3,18	14
3	4,28	8	2,67	16	3,98	7	4,35	6	2,45	17
4	3,72	9	3,17	13	4,39	7	3,85	8	2,97	15
5	2,97	10	3,51	12	4,08	6	3,73	9	2,91	15
6	3,01	9	2,58	16	3,79	7	4,22	6	2,23	17
7	3,33	9	3,07	13	4,27	7	4,25	6	2,65	16
8	3,74	9	2,48	16	3,95	8	3,87	9	2,21	18
9	3,74	9	2,43	16	3,84	8	4,27	6	2,84	17
10	2,44	10	2,83	16	3,90	8	4,00	7	2,72	16
11	3,20	9	2,51	16	4,38	7	4,06	7	2,96	13
12	4,30	8	2,36	15	4,38	7	4,37	6	3,18	12
13	4,83	8	2,49	16	3,75	8	3,66	8	2,37	14
14	2,92	9	2,99	16	3,95	8	4,21	7	2,72	16
15	3,68	9	3,33	13	3,76	8	3,93	7	2,68	16
16	4,91	8	2,26	15	4,39	7	3,67	9	2,38	18
17	3,89	9	2,93	14	4,44	3	3,74	8	2,18	18
18	2,50	10	3,18	12	4,12	5	3,61	9	3,09	10
	64,63	161,00	49,54	267,00	72,94	126,00	71,73	130,00	48,58	278,00

Durante la prueba de campo, se presentaron inconvenientes en la toma de datos por medio del sensor, debido a que el tipo de investigación se llevo a cabo en seres vivos. Es más, se despliegan variables externas que pueden afectar el comportamiento, por ejemplo, en este proyecto, se presentaron casos en los que los sensores no tomaron datos porque la vaca perdió el sensor o las antenas de GPS 6M no captaron la latitud y longitud del animal por periodos de tiempo. Lo anterior se ve reflejado en la *Figura 9*, donde se observa que la variable de distancia recorrida presenta datos atípicos, los cuales fueron el resultado de errores y contingencias en las pruebas de campo anteriormente mencionados. Por otro lado, la *Tabla 6* muestra que los datos no son dispersos, puesto que los puntos están cerca a la media y que la variable *Distancia recorrida* tiene una asimetría negativa, mientras que la variable *Producción* tiene una asimetría positiva. En efecto, se dice que la variable *Producción* no presenta datos atípicos, puesto que es una base de datos generada por un trabajador de campo, quien ejecuta el proceso de pesaje de leche, el cual para efectos del desarrollo del proyecto se analizó en los días de prueba.

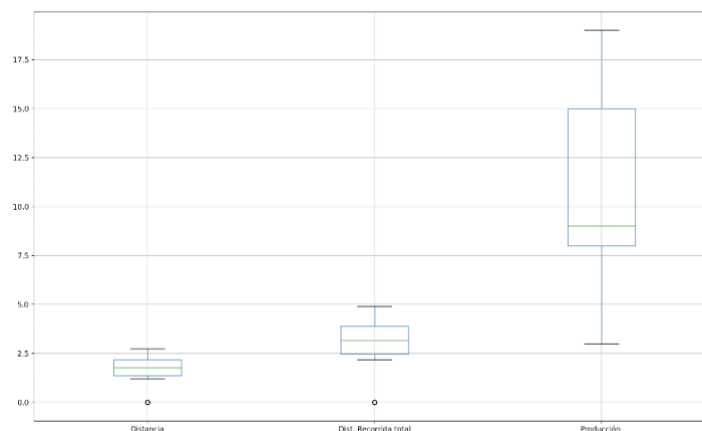


Figura 9. Diagrama de caja y bigotes.

Tabla 6. Métricas de las variables Distancia y Producción

Métrica	Distancia recorrida total	Producción
Varianza	0,5546	15,9920
Desv. Estandar	0,7447	3,9990
Coef. Variacion	0,2180	0,3741
Kurtosis	-1,1586	-1,2361
Asimetria	-0,0165	0,3819

5.3.3 Preparación de los datos

Teniendo en cuenta el método de generación de datos, se encontró que en ocasiones los sensores generaban coordenadas nulas, es decir que las latitudes y longitudes las arrojaba en cero. Esta situación ocasionaba un sesgo al momento de generar la distancia recorrida total, al considerar que estos saltos entre coordenadas resultaban en un mayor recorrido inexistente. Por lo que fue necesario eliminar estas coordenadas de la base de datos. Adicionalmente, en el análisis descriptivo de las variables se encontraron datos atípicos, debido a errores en el sensor y en la prueba de campo, por lo cual, de 21 días de monitoreo se ajusta a 18 días.

En la *Figura 10* se puede observar el histograma de la variable *Producción*, donde se evidencia que los litros diarios producidos por vaca oscilan entre los 3 y 18 litros/día; este comportamiento enciende una alarma en el negocio, al considerar que el promedio de producción es de 10.9 litros/día, y por las condiciones y recursos de la Hacienda La Diana debería ser superior a 18 litros/día (COBINAGA, 2021).

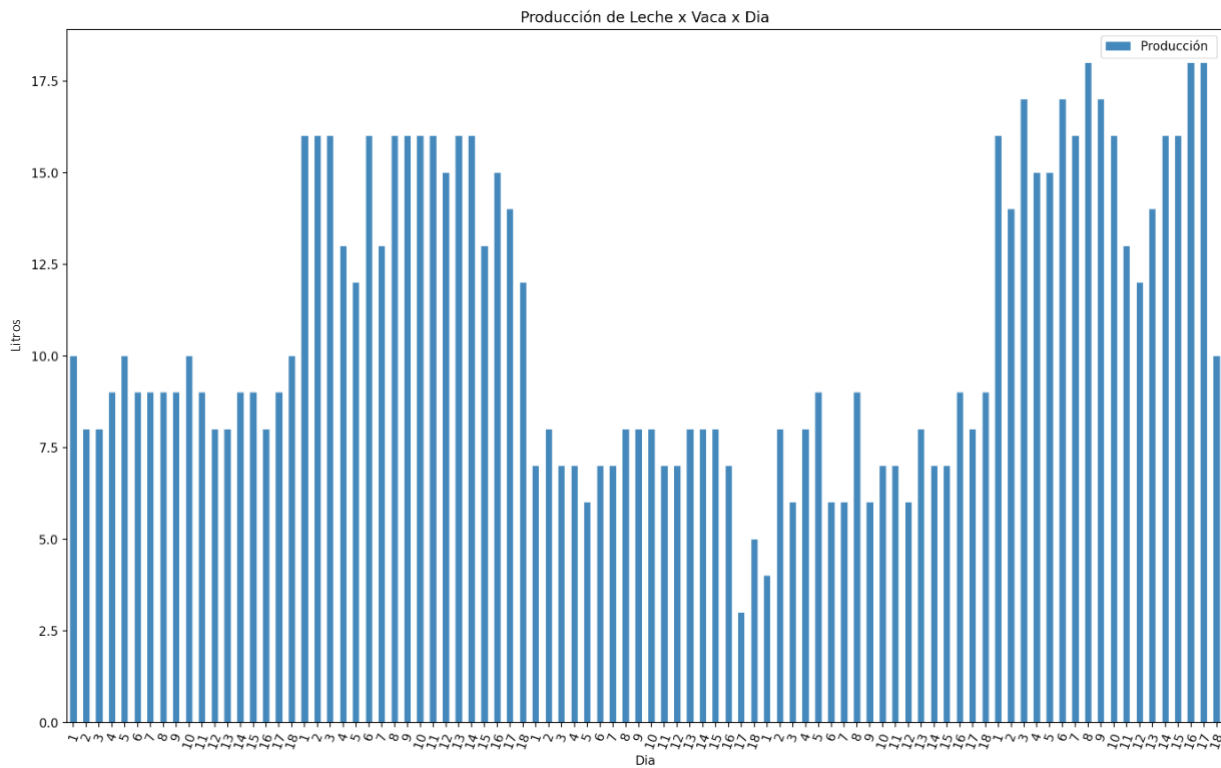


Figura 10. Histograma – Producción leche/día por vaca.

El gráfico y la prueba de correlación muestran una relación lineal, de intensidad considerable ($r= 0.866$) y significativa con un *p.value* menor que 0.05 (*Figura 11*). En concreto, tiene sentido intentar generar un modelo de regresión lineal con el objetivo de predecir la producción de leche en función de la distancia recorrida del bovino.

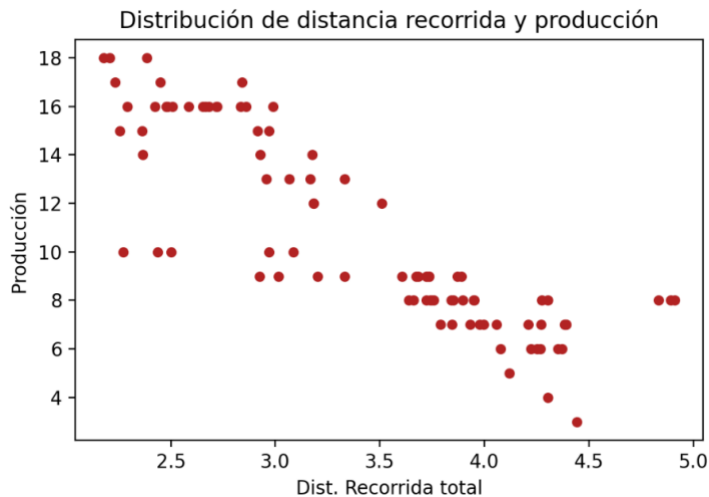


Figura 11. Diagrama de dispersión.

Por otro lado, la primera aproximación es dividir la base de datos en dos: (a) entrenamiento y (b) validación. Para esto es importante destacar que no se ha definido un criterio único para establecer la proporción de las bases de datos. Sin embargo, varios estudios han mostrado de manera empírica, que con frecuencia se usa el 80% de los datos para la base de entrenamiento y el 20% de los datos para la base de validación con la intención de generar un modelo con unos datos iniciales y poder confrontar la predicción con datos reales.

5.3.4 Modelación

Se ejecuta la regresión lineal MCO (Mínimos cuadrados ordinarios) en Python, para generar la predicción de la producción de leche de la Hacienda La Diana, teniendo en cuenta la distancia recorrida por dicho animal durante el día. Este modelo permite comprender lo que sucede en el campo de estudio, permite prever la mejor situación y examinar las causas que hacen que algo suceda en un lugar determinado. Es decir, lo que busca el modelo MCO es encontrar los parámetros α y β para los cuales se minimiza el término de error.

En concreto, el modelo MCO se utiliza como una estrategia para obtener como mejor modelo la recta que minimiza la suma de las desviaciones verticales entre cada dato de entrenamiento y la recta, elevadas al cuadrado. Como se observa en la Figura 12, la línea azul representa la recta de regresión, es decir, el modelo, y la recta intermitente color rojo representa los límites inferiores y superiores.

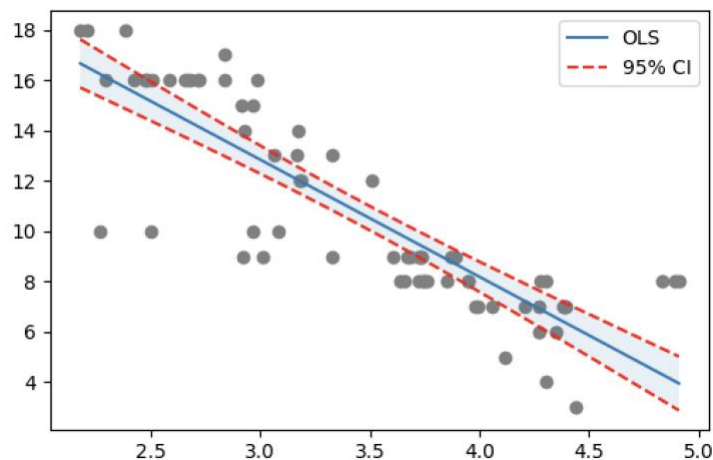


Figura 12. Gráfico . Modelo MCO.

Para evaluar el rendimiento del modelo, se identifican los valores de R cuadro múltiple y R cuadrado ajustado. Al ejecutar el modelo, se obtiene un R cuadrado con valor de 0.741, lo que indica que el modelo explica aproximadamente el 74% de la variación de la variable dependiente **Producción_total**. Por otro lado, se analiza el estadístico F, puesto que este responde a la pregunta de si el modelo en su conjunto es capaz de predecir la variable respuesta mejor de lo esperado por azar. En este caso en específico, se obtiene un estadístico F igual a 200.5, lo que implica que el modelo es útil y que presenta evidencias de que la varianza explicada por el modelo es superior a las esperada por azar (varianza total) (Figura 13).

Llegados a este punto, se observa en la Figura 13, el coeficiente de la regresión lineal, con un valor igual a 26.7952, el cual hace referencia al valor de la intersección. Asimismo, se obtiene el coeficiente de valor de -4.6532, el cual afecta a la variable **Produccion_total**, cada vez que varía la variable **Distancia_total**. En este caso, se presenta una relación inversa entre ambas variables, debido a que el coeficiente es negativo; esto quiere decir que entre mayor distancia recorra el animal, menor va a ser su producción de leche. Obteniendo como resultado del modelo la siguiente ecuación:

$$\text{Producción_total} = 26.7952 - 4.6532 * \text{Distancia_recorrida}$$

Al mismo tiempo, se determina asimetría negativa, ya que del modelo se obtiene un sesgo de -0,544. Sin embargo, al obtener un coeficiente de curtosis mayor que 3, se evidencia una distribución leptocúrtica, es decir, el modelo presenta un elevado grado de concentración alrededor de los valores centrales de la variable (Figura 13).

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	y	R-squared:	0.741			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.738			
Method:	Least Squares	F-statistic:	200.5			
Date:	Sun, 03 Oct 2021	Prob (F-statistic):	3.10e-22			
Time:	20:34:38	Log-Likelihood:	-152.13			
No. Observations:	72	AIC:	308.3			
Df Residuals:	70	BIC:	312.8			
Df Model:	1					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	26.7952	1.157	23.157	0.000	24.487	29.103
x1	-4.6532	0.329	-14.161	0.000	-5.309	-3.998
Omnibus:	5.667	Durbin-Watson:	2.202			
Prob(Omnibus):	0.059	Jarque-Bera (JB):	4.834			
Skew:	-0.544	Prob(JB):	0.0892			
Kurtosis:	3.654	Cond. No.	18.3			

Figura 13. Resultados de la regresión lineal MCO.

Finalmente, se diseñó un mapa de calor (Figura 14.), con el propósito de estudiar los datos y analizar el comportamiento de los bovinos, con la finalidad de generar una herramienta útil para evaluar las condiciones del forraje, y soportar la toma de decisiones de siembra y mantenimiento de la Hacienda La Diana.



Figura 14. Mapa de calor – Recorrido de las cinco vacas.

Por último, se agrega al modelo analítico 4 variables binarias que hacen referencia a las 5 vacas en estudio; como se observa en la *Tabla 7*, las vacas 2 y 5 son aquellas que tienen un promedio de producción superior a los 12 litros, lo que representa una “buena vaca” para la hacienda, teniendo en cuenta las condiciones y características del hato de la Hacienda La Diana. Por otro lado, se puede observar que las vacas 3 y 4 poseen una producción promedio baja, ya que no llegan a producir los 10 litros, lo que definiría a una vaca como “vaca de descarte”. Finalmente, se tiene la vaca 1 como la promedio, es una vaca en estudio ya que, al mejorar la dieta suministrada y el recorrido dentro de los potreros, puede llegar a aumentar sus niveles de producción.

Vaca	Producción	Producción promedio diaria	Producción 18 días
1	Promedio	9	161
2	Alta	15	267
3	Baja	7	126
4	Baja	7	130
5	Alta	15	278

Tabla 7. Características de las 5 vacas en estudio

Ahora bien, las cuatro variables binarias explicadas a continuación, se crean con el objetivo de analizar el comportamiento del modelo en función del coeficiente de correlación cuando se considera la variable de la vaca (*Figura 15*). Se debe tener en cuenta que cuando todas las variables β_i toman el valor de 0, significa que esos datos corresponden a la vaca # 5. Por otro lado, para este caso se trabaja con un modelo de regresión múltiple, el cual explica el 90.6% de la variación de la variable **Producción_total**, obteniendo un mejor ajuste y finalmente la siguiente ecuación.

$$\beta_1 = \begin{cases} 1, \text{recorre la distancia 1 y la producción 1} \\ 0, \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$\beta_3 = \begin{cases} 1, \text{recorre la distancia 3 y la producción 3} \\ 0, \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$\beta_2 = \begin{cases} 1, \text{recorre la distancia 2 y la producción 2} \\ 0, \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$\beta_4 = \begin{cases} 1, \text{recorre la distancia 4 y la producción 4} \\ 0, \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$Producción_{total} = 21.01 - 2.02 * Distancia_{recorrida} - 4.68 * \beta_1 - 0.52 * \beta_2 - 5.77 * \beta_3 - 5.58 * \beta_4$$

Adicionalmente, en la *Figura 15*, se evidencia que los resultados del coeficiente de correlación, la prueba F y los intervalos de confianza, confirman la existencia de una relación entre la distancia recorrida y los niveles de

producción. Asimismo, la prueba de Durbin-Watson garantiza que los errores no están correlacionados, puesto que con una significancia del 5%, se obtiene un valor mayor 1.4 (D_u). Finalmente, se concluye que es importante contemplar las características de los nodos sustentado en la mejora del ajuste, ya que aumenta en un 16%.

```

=====
                        OLS Regression Results
=====
Dep. Variable:          Producción      R-squared:              0.906
Model:                  OLS             Adj. R-squared:         0.899
Method:                 Least Squares  F-statistic:            126.9
Date:                   Sat, 15 Jan 2022  Prob (F-statistic):     1.84e-32
Time:                   10:17:25       Log-Likelihood:         -115.77
No. Observations:      72             AIC:                    243.5
Df Residuals:           66             BIC:                    257.2
Df Model:               5
Covariance Type:       nonrobust
=====

```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	21.0160	0.951	22.091	0.000	19.117	22.915
Dist. Recorrida total	-2.0219	0.322	-6.279	0.000	-2.665	-1.379
B1	-4.6863	0.560	-8.369	0.000	-5.804	-3.568
B2	-0.5269	0.472	-1.117	0.268	-1.468	0.415
B3	-5.7741	0.662	-8.717	0.000	-7.097	-4.452
B4	-5.5802	0.616	-9.052	0.000	-6.811	-4.349

```

=====
Omnibus:                25.886      Durbin-Watson:          2.022
Prob(Omnibus):          0.000      Jarque-Bera (JB):       42.442
Skew:                   -1.370     Prob(JB):                6.08e-10
Kurtosis:               5.577      Cond. No.                 29.0
=====
Notes:
[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

Intervalo de confianza para los coeficientes:

```

	0	1
const	19.116512	22.915403
Dist. Recorrida total	-2.664873	-1.378962
B1	-5.804343	-3.568292
B2	-1.468415	0.414520
B3	-7.096605	-4.451503
B4	-6.811061	-4.349413

```

El error (rmse) de test es: 1.034213717725084
=====

```

Figura 15. Resultados de la regresión lineal MCO.

5.3.5 Evaluación modelo analítico MCO

Para analizar los coeficientes del modelo de regresión, se realizaron los intervalos de confianza con una confianza del 95% que evidencia que el cero no pertenece al intervalo de confianza de β_1 , es decir, que si existe una correlación lineal y la distancia si describe el comportamiento de la producción. Por otro lado, como β_1 es la pendiente de la recta ajustada, se tiene que, por cada incremento en una unidad en la distancia, la variable de producción decrecerá entre 5.3085 y 3.9978 unidades.

$$IC_{\beta_0 \ 95\%} = [24.4874, 29.1029] \quad IC_{\beta_1 \ 95\%} = [-5.3085, -3.9978]$$

Finalmente, para verificar el modelo y determinar la cantidad de error que existe entre dos conjuntos de datos, se compara el valor predicho y el valor observado. Al ejecutar el modelo con la base de prueba, es decir el 20% de los datos, se obtiene un RMSE de 1.9801; lo que quiere decir que las predicciones del modelo final se alejan en promedio 1.98 unidades del valor real.

5.4. Etapa 4 - Validación

Esta sección se divide en dos partes, la primera expone la prueba de usabilidad y de funcionalidad, y la segunda el impacto operativo.

5.4.1 Prueba de usabilidad y funcionalidad

La prueba de usabilidad y funcionalidad consistió en la ejecución del trabajo de campo en la Hacienda La Diana, donde se usaron los sensores construidos para formar el sistema de monitoreo (*Ilustración 1.*), los cuales tenían

un intervalo de 4 a 6 horas de trabajo para la toma de datos, con un lapso de 33 segundos. En concreto, se probaron 5 nodos, durante 21 días. Los cuales proporcionaban la información de longitud, latitud, hora y fecha, con la intención de detectar la distancia diaria recorrida total del animal (*Diagrama 5*). En paralelo se cuenta con la información de los litros diarios respectivos producidos por el nodo, en este caso, el bovino con el sensor de georreferenciación. En este punto, es importante aclarar que se usó un factor de corrección de 1.8 en la distancia recorrida diaria, teniendo en cuenta que los dispositivos trabajaron en un lapso de 4 a 6 horas, por temas de usabilidad y condiciones del recurso. Esta constante se consultó con un experto técnico de COBINAGA.



Ilustración 1. Vacas La Hacienda La Diana

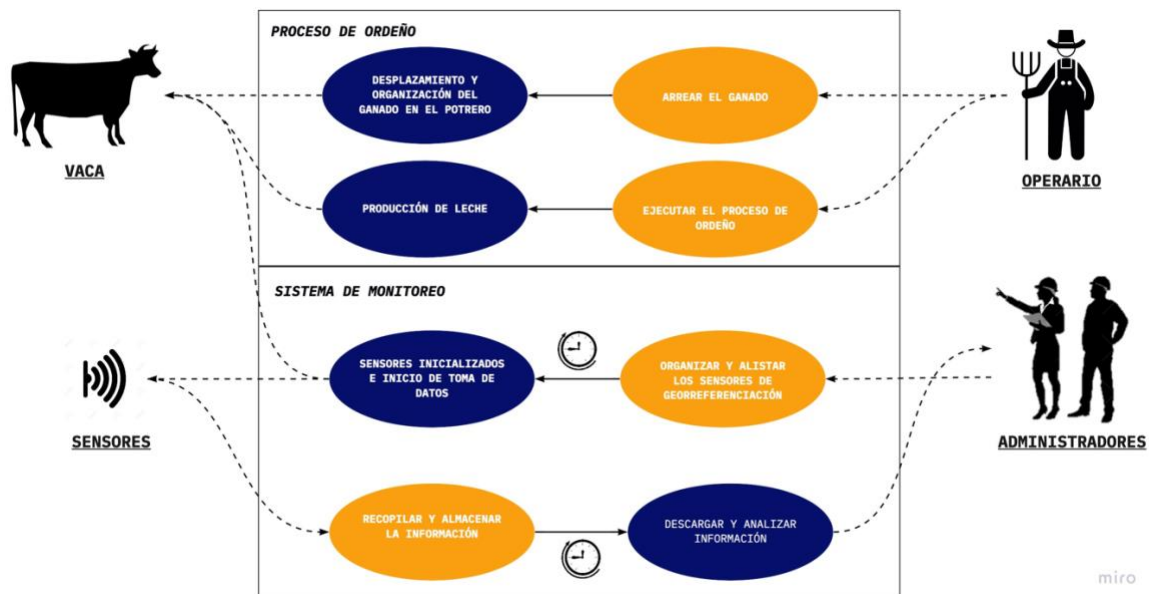


Diagrama 5. Proceso de ordeño y sistema de monitoreo de la Hacienda La Diana

La *Figura 15* muestra la ubicación y los linderos de la Hacienda La Diana dividido en tres zonas específicas, durante el desarrollo del proyecto los datos recopilados en el sistema de monitoreo fueron desarrollados en las zonas azul y amarilla. Esto debido a que los potreros de la zona verde ya habían sido ocupados por el ganado anteriormente.

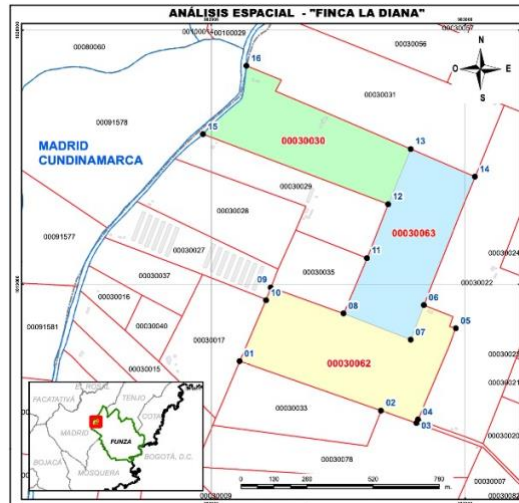


Figura 16. Análisis espacial – Hacienda La Diana

Por otra parte, la escogencia de los animales se determinó por la producción de leche diaria y teniendo en cuenta el volumen de ganado de la Hacienda La Diana. En concreto, la hacienda lleva registro de los grupos de vacas con un desempeño de producción “bueno”, “malo” y “regular”, por lo que se decide escoger una o dos vacas de dichos grupos, con el objetivo de tener un análisis de cada una de las categorías. La Figura 17 muestra que para realizar el monitoreo se escogieron dos vacas “buenas”, dos “malas” y una “regular”; con una producción promedio de 15 litros, 7 litros y 9 litros, respectivamente. Adicionalmente, se observa que entre menor recorrido realiza el animal, más producción de leche obtiene; lo que tiene sentido con la literatura, ya que lo ideal es que la vaca no gaste mucha energía transportándose de un lugar a otro sino en el proceso de ordeño, que es la actividad que mayor energía requiere. Es importante resaltar que conocer ese mayor gasto energético, se convierte en un factor determinante para la formulación de la dieta.

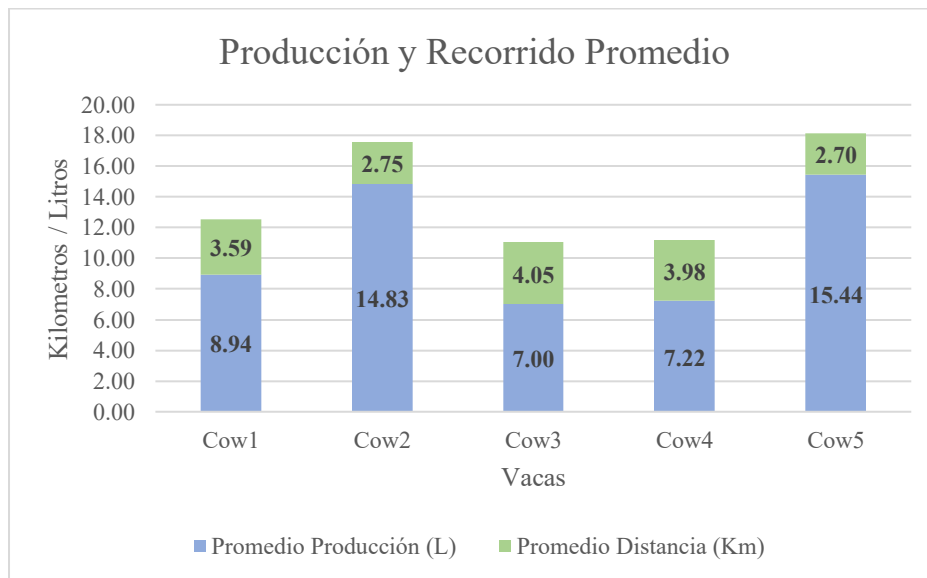


Figura 17. Gráfico del promedio de la producción y la distancia recorrida de los nodos.

Ahora bien, es importante resaltar la dificultad que se presentó para ejecutar el monitoreo dentro de la Hacienda La Diana, puesto que el sistema de monitoreo se realizó en seres vivos y existía la limitación de la capacidad de carga de la batería conectada al dispositivo. En específico, las baterías tenían una duración aproximadamente

de 8 horas, y para la prueba de campo se debía reemplazar las baterías, guardar la información del día anterior y correr el código para reiniciar el monitoreo.

Se aplica el concepto de usabilidad y funcionalidad, el cual consiste en evaluar la rapidez y facilidad de desarrollar la actividad por parte de los trabajadores a través del uso del producto objeto de interés, es decir, la implementación del sistema de monitoreo. En este caso en particular, el sistema propuesto en este estudio cumple con el objetivo, el cual hace referencia a captar información que permite llevar un control y soporta la toma de decisiones, al optimizar tareas tan simples como lo es ir a verificar el ganado constantemente. Sin embargo, existe una falencia en términos de almacenamiento de la información, que facilite la trazabilidad y ergonomía del sistema para el usuario.

5.4.2 Impacto Operativo

El sistema de monitoreo permite a la administración tener una herramienta de control que apoya la toma de decisiones y la operación de la ganadería. En este caso puntual, se observa un mecanismo importante de detección temprana de enfermedades, las cuales explican una disminución relevante en el recorrido diario del animal, que finalmente se traduce a disminución de costos o maximización de beneficios por ventas. En este último escenario, es importante resaltar el impacto que tiene el estado del animal en el precio de venta y el apoyo que se vuelve este mecanismo de control en la operación.

Por otro lado, el análisis del modelo en términos de recorrido y las zonas no concurridas por los nodos, permiten evaluar las condiciones del forraje. En este punto, el diseño del mapa de calor proporciona un análisis del comportamiento de los bovinos; convirtiéndose en una herramienta útil para evaluar las condiciones del forraje y soportar la toma de decisiones de siembra y mantenimiento de estos. Además, debido a los avances tecnológicos e implementación de Industrial 4.0 en las empresas ganaderas, la compañía colombiana SADEP Ltda. desarrollo el software TaurusWeb, que en menos de 1 hora y en tiempo real, brinda información sobre las propiedades del forraje; lo que apoya a la administración de la industria. En específico, se realiza un estudio bromatológico, en la Hacienda La Diana, de las zonas que presentaban una menor acumulación de recorrido y se identifica que las condiciones del forraje no son las adecuadas y no brindan el nivel de nutrientes necesario para los animales. Consecuentemente a esta acción, el volumen de concentrado y sal suministrado al ganado es mucho mayor y posteriormente genera un aumento significativo en los costos del negocio.

Por último, se evidencia una fuerte correlación entre la distancia recorrida y la producción de leche, entre mayor sea la distancia, menor es la producción. Lo cual se analizó con el administrador de la Hacienda, el veterinario y expertos de COBINAGA; dejando como conclusión que es coherente esta información, teniendo en cuenta que el animal debe gastar más energía en el desplazamiento, lo cual afecta la producción. Esto ocurre cuando la calidad del forraje esta baja, y los animales se ven forzados a cubrir mayor rango para poder satisfacer su dieta. Para esto, se planea una asesoría técnica con COBINAGA, para mejorar el estado del forraje y la calidad de la dieta del ganado. Factor que impacta directamente en la productividad del negocio y su estructura de costos.

6. Resultado y análisis

A partir de la caracterización del proceso y el entendimiento del negocio se comprende la importancia que adquiere la administración y control de los forrajes en la industria pecuaria, teniendo en cuenta que fundamenta la dieta y la estructura de costos del negocio. Asimismo, se observa que las buenas practicas ganaderas y el seguimiento adecuado del proceso de producción de leche impulsa la productividad, la calidad de la materia prima y los ingresos por litro de leche.

Por otro lado, se identifica el reto que existe en el sector pecuario colombiano en términos de adopción de tecnologías e implementación de industria 4.0, debido a los altos costos, la cobertura y funcionalidad del mercado existente. Por lo que es difícil implementar proyectos sostenibles involucrando estos avances en el modelo de negocio ganadero. No obstante, este es uno de los principales objetivos de Fedegan y la industria pecuaria para la siguiente década. De este modo, este proyecto muestra la funcionalidad de los sensores de georreferenciación y la clara dificultad que existe cuando se intenta crear un sistema de monitoreo aplicado en

seres vivos, tras considerar el reto que conlleva la producción de información, el almacenamiento, recolección de datos y mantenimiento de los nodos.

Adicionalmente, el resultado de la investigación evidencia que existe una relación inversa entre la distancia y la producción. Esta situación refuerza la importancia que tiene la calidad del forraje y la dieta en la productividad de esta industria. En concreto, el sistema de monitoreo y el aprovechamiento de las tecnologías y la industrialización permiten maximizar los beneficios del negocio, al generar un mayor control e información, que se convierte en la materia prima de los modelos analíticos, que a su vez se transforman en una herramienta para el análisis y la toma de decisiones administrativas y operacionales de la ganadería (Tabla 8).

Herramienta	Soporte	Detalle
<i>Monitoreo</i>	<i>Manejo de Forrajes</i>	Facilita tomar la decisión de realizar un estudio agrónomo para evaluar la calidad de los forrajes y la oportunidad de implementar un inter-siembro.
	<i>Control de Enfermedades</i>	Detección temprana de enfermedades, que impactan en una disminución de costos por tratamientos veterinarios o mejora el precio de venta del bovino.
<i>Modelo Analítico</i>	<i>Calidad de los Potreros</i>	Simplifica la clasificación de las zonas que no son concurridas por los bovinos, para estudiar las razones y ejecutar las soluciones.
	<i>Control de Producción</i>	Soporta el control de la producción por medio del análisis del comportamiento de los bovinos y el recorrido, para desarrollar proyecciones y monitorear el negocio con indicadores de desempeño.

Tabla 8. Soporte de toma de decisiones.

Ahora bien, los resultados del modelo exponen los problemas en términos de productividad que presenta la Hacienda La Diana, reflejados en los bajos niveles de producción, que pueden estar sustentados por problemas en la calidad y manejo de forrajes, ausencia de planeación de la distribución de los animales y los potreros, desembocando en deficiencias técnicas en el manejo administrativo dentro del negocio. En este punto y como resultado de esta investigación, la organización comenzó una alianza estratégica con COBINAGA enfocada en mejorar los niveles de productividad y calidad de la leche cruda producida. Estos convenios han permitido mejorar la estructura de costos del negocio, a partir de un aumento en el precio por litro de leche, alianzas comerciales con proveedores, análisis agrónomos y planificación de producción de comida con el propósito de obtener un modelo de producción sostenible.

7. Discusión

La discusión de este proyecto gira entorno a la contribución de la siguiente pregunta de investigación *¿Cómo se podría mejorar la productividad en un sistema de producción de leche cruda colombiano, a partir del desarrollo de un modelo analítico predictivo embebido en un sistema de monitoreo basado en tecnología de internet de las cosas?*

La productividad en un sistema de producción de leche cruda colombiano presenta el reto de aplicar avances tecnológicos e implementaciones innovadoras para el mejoramiento y apalancamiento del negocio. Es más, como Yan lo propuso en el año 2015, el uso de una herramienta de análisis y predicción para controlar el rendimiento de la leche (PAT), brinda un apoyo a la industria para definir soluciones a problemas de productores de pequeña escala, mediante el tratamiento de los datos con la metodología de regresión analítica, series de tiempo y machine learning (Yan, 2015). En este proyecto se evidencia que existen resultados favorables para el acompañamiento y soporte de las decisiones dentro de la industria. Al momento de generar datos, la industria adquiere información para generar modelos de predicción, estadísticas y patrones de comportamiento que permitan controlar el modelo de producción, al emplear metodologías de análisis de datos, en este caso en específico, se presentó un modelo analítico predictivo embebido en un sistema de monitoreo basado en tecnología de internet de las cosas aplicado en la Hacienda La Diana, donde se encuentra que existe un impacto negativo en términos de productividad cuando los tiempos de desplazamientos de los bovinos aumenta, por lo que se debe compensar este gasto energético con suplementos nutricionales. Asimismo, se expone que el

sistema de monitoreo permite un mayor control sobre los animales y sus condiciones, transformándose en un soporte para la industria en temas de la detección temprana de enfermedades, composición nutricional de la dieta y reducción de costos, fundamentada en la construcción de condiciones optimas para la vida del bovino.

Ahora bien, las industrias están trabajando para automatizar sus procesos y reforzarlos con tecnología con el propósito de monitorear y controlar la producción. SMARTBOW Eartag es un ejemplo claro de la aplicación de la industria 4.0 en el sector pecuario, puesto que es un sensor enfocado en captar y monitorear diferentes etapas como lo son la “rumia”, “comiendo”, “descansando” y “activos”, mediante una relación directa entre el comportamiento y el movimiento del oído (Reiter et al.; 2018). Este es un claro ejemplo de las tecnologías existentes y funcionales para mantener y aumentar el rendimiento de la industria; sin embargo, el común denominador que buscamos en este proyecto es la automatización con bajo costo la cual busca generar el máximo beneficio con la menor cantidad de recursos posibles. Este concepto, se expone en este proyecto, ya que se implementó un sistema de monitoreo por medio del uso de sensores de georreferenciación conectados a un Raspberry con el objetivo de vigilar y obtener el recorrido del animal, permitiendo así un control sobre el gasto de energía del animal, el cual posteriormente se ve reflejado en el aumento de producción de leche, y el manejo y distribución de las praderas.

Recientemente, las tecnologías desarrolladas para el monitoreo y control en tiempo real permiten llevar un registro de la rumia, los movimientos, el ciclo de vida y distribución del animal. Sin embargo, las aplicaciones de dicha tecnología en el sistema de producción de leche cruda en Colombia son reducidas y muy costosas, por lo que se propone una tecnología inicial para llevar el control de los animales y el apoyo a la administración y toma de decisiones. Mas aun, el modelo analítico predictivo es una herramienta adicional para obtener una idea del comportamiento de los animales, y como el modelo MOOCARE aplicado por Rigui en el 2019, permite asistir a los productores desarrollar una planeación de la dieta y de este modo asegurar la producción de leche cruda y finalmente, compensar los costos.

En conclusión, el desarrollo de las tareas de la industria para la producción de leche cruda, se deben reforzar con herramientas tecnológicas con el propósito de automatizar procesos, acabar con los tiempos muertos, optimizar tareas y aumentar la rentabilidad. En esa misma línea, existen varios estudios para automatizar los procesos de esta industria mediante la implementación de tecnologías, los cuales sirven como base para realizar un prototipo asequible e integrado para la utilización en el sector pecuario colombiano. Estudios como los de Borches, Bikker, Iwersen, entre otros que buscan construir un sistema de monitoreo con el objetivo de apoyar la toma de decisiones y mejorar los procesos (Iwersen et al.; 2018). Sin embargo, la implementación del sistema de monitoreo por medio de la utilización de sensores de georreferenciación es una etapa inicial del proyecto que se puede implementar en esta industria, dado que es un sistema que almacena información fundamental para la planeación y administración de las tareas diarias. No obstante, este sistema presenta un nivel de dificultad a la hora de adquirir la información debido a las limitaciones financieras y logísticas, por lo que se recomienda continuar con su estudio y buscar opciones asequibles para la construcción del almacenamiento de los datos, la adquisición de nuevos dispositivos de georreferenciación y baterías con mayor capacidad o la integración de fuentes de alimentación con paneles solares, que optimicen la toma de datos y mejoren la usabilidad de los sensores.

8. Conclusiones y perspectivas de investigación

Este proyecto deja en evidencia que, para maximizar la productividad de la producción de leche cruda, es necesario garantizar una buena calidad de forraje en conjunto con una planeada y adecuada dieta nutricional para los bovinos. Asimismo, el diseño de los potreros y el control sobre el desplazamiento se vuelven variables importantes que se deben definir a partir de las condiciones del negocio.

A partir de la caracterización del proceso, se encuentra que es importante respetar las etapas del proceso para prevenir enfermedades y reducciones en los niveles de producción de leche. Igualmente, el conocer el proceso ayuda a identificar opciones de mejoras, como tiempos muertos, calidad de los equipos y estandarización para la mejora continua. Por otro lado, las buenas practicas ganaderas se convierten en una herramienta necesaria para controlar la operación de esta industria y regular los procesos de producción pecuarios.

Ahora bien, se comprueba que se puede construir un sensor de georreferenciación a bajo costo que permita conocer el recorrido aproximado de los bovinos al día y generar la base de datos para el modelo analítico. A partir del análisis de este modelo, se observa que es necesario evitar que los bovinos tengan largos desplazamientos en el día, y en caso de que se presenten se debe suplir con la dieta para evitar disminución de los niveles de producción de leche. Asimismo, se expone que esta herramienta soporta el análisis y control de las praderas por medio del mapa de calor y la identificación de las zonas menor concurridas por el ganado. Sin embargo, es prudente destacar que la prueba de usabilidad y funcionalidad deja como aprendizaje que no es fácil la toma de datos con los animales, por lo que es necesario una planeación de una caja que cubra y proteja el sensor y su antena. También es importante clasificar a los bovinos con los sensores para la identificación al momento de cambiar la batería de los sensores y obtener un proceso eficiente.

No obstante, para trabajos futuros es interesante terminar de considerar la capa física de IoT, donde se defina el uso de la nube como almacenamiento de datos, lo cual permita tener la información en tiempo real, con el uso de internet y servicios de almacenamiento que ofrece el mercado. Este escenario, expone aun más los beneficios de control, en temas de seguridad y administración de las enfermedades de los bovinos. Asimismo, sería interesante proponer un sistema integrado de carga con paneles solares, que permita que los sensores estén cargados siempre y se tenga la información de las 24 horas del día. Con esto se podría construir análisis por franjas horarias de movimientos y calcular el gasto genérico generado por los desplazamientos que posteriormente pueden ser suplidos en la dieta nutricional con suplementos y analizar el impacto y beneficios en términos de niveles de producción de leche. Por otro lado, se puede considerar la exploración y el estudio de variables como la temperatura, el ciclo productivo del animal, la edad, la condición corporal y la raza, en términos de su relación con la productividad. La inclusión de estas variables representa un gran reto de investigación teniendo en cuenta la complejidad que existe para monitorear y recopilar esta información.

Asimismo, se puede contemplar la integración del monitoreo con un mapa integrado con los diseños de los potreros, con el propósito de evaluar la calidad de los potreros y generar una clasificación que se pueda usar como herramienta de análisis y composición de los potreros, para toma de decisiones de mantenimiento e inversión de forrajes. Adicionalmente, puede volverse como punto de control para la administración, ya que no debería haber bovinos en potreros diferentes a los previstos en cada ciclo, por lo que se puede controlar la distribución y se vuelve una fuerte herramienta de seguridad para la industria.

Referencias

- Borchers, M. R., Chang, Y. M., Tsai, I. C., Wadsworth, B. A., & Bewley, J. M. (2016). A validation of technologies monitoring dairy cow feeding, ruminating, and lying behaviors. *Journal of Dairy Science*, 99(9), 7458–7466. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10843>
- Caja, G., Castro-Costa, A., & Knight, C. H. (2016). Engineering to support wellbeing of dairy animals. *Journal of Dairy Research*, 83(2), 136–147. <https://doi.org/10.1017/S0022029916000261>
- Das, S. K. (2018). Impact of climate change (heat stress) on livestock: adaptation and mitigation strategies for sustainable production. *Agricultural Reviews*, 39(of), 130–136. <https://doi.org/10.18805/ag.r-1777>
- Reiter, S., Sattlecker, G., Lidauer, L., Kickinger, F., Öhlschuster, M., Auer, W., ... Iwersen, M. (2018). Evaluation of an ear-tag-based accelerometer for monitoring rumination in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 101(4), 3398–3411. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12686>
- Matere, J., Simpkin, P., Angerer, J., Olesambu, E., Ramasamy S., (2018). Predictive Livestock Early Warning System (PLEWS): Monitoring forage condition and implications for animal production in Kenya. *Journal of Dairy Science*, 2212-0947/ © 2019 The Food and Agriculture Organization of the United Nations. Published by Elsevier B.V.
- Yan, W., Chen, X., Akcan, O., Lim, J., Yang, D., (2015). Big data analytics for empowering milk yield prediction in dairy supply chains. *Journal of 2015 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*
- Righi, R., Goldschmidt, G., Kunst, R., Deon, C., André da Costa, C., (2019). Towards combining data prediction and internet of things to manage milk production on dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 0168-1699/ © 2020 Elsevier B.V.
- FAO. (2018). Food and Agriculture Organization of United Nations. Obtenido de <http://www.fao.org/home/en/>
- FEDEGAN. (2018). Federación Colombiana de Ganaderos. Recuperado el 19 de septiembre de 2018, de Federación Colombiana de Ganaderos: <https://www.fedegan.org.co/>

- FEDEGAN. (2020). Federación Colombiana de Ganaderos. Recuperado el 1 de septiembre de 2020 de las Cifras de referencias del sector ganadero colombiano, de Federación Colombiana de Ganaderos: <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/documentos-de-estadistica>
- STATISTA. (2020) Projected market value of livestock monitoring and management worldwide from 2016 to 2021, Obtenido de: <https://www.statista.com/statistics/823561/global-livestockmonitoring-and-management-market-value/>
- BBC News Mundo. (2020) Coronavirus y economía | V, U, o W: los 3 escenarios posibles para la recuperación económica tras la pandemia de covid-19 from 2020, Obtenido de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-52267326>
- SEDESOL. (2007). Secretaría de Desarrollo Social. Manual de Normas de Control de Calidad. Obtenido de <http://www.liconsa.gob.mx/wp-content/uploads/2012/01/man-nor-cont-cal-leccruda-hist.pdf>
- FAO. (2020). Food and Agriculture Organization of United Nations. Obtenido de <http://www.fao.org/dairy-production-products/production/dairy-animals/cattle/es/>
- UPRA. (2020). Unidad de Planificación Rural Agropecuaria Cadena Láctea colombiana. Obtenido de http://www.andi.com.co/Uploads/20200430_DT_AnalSitLecheLarga_AndreaGonzalez.pdf
- Uribe F., Zuluaga A.F., Valencia L., Murgueitio E., Ochoa L. 2011. Buenas prácticas ganaderas. Manual 3, Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible. GEF, BANCO MUNDIAL, FEDEGÁN, CIPAV, FONDO ACCION, TNC. Bogotá, Colombia. 82 p.
- FAO. (2020). Food and Agriculture Organization of United Nations. Obtenido de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QL>
- ICA. (2020). Buenas Practicas Ganaderas. Obtenido de <https://www.ica.gov.co/getattachment/ICAComunica/Infografias/Plegable-BPG-ICA.pdf.aspx?lang=es-CO>
- Agronegocio. (2020). El software ‘Animal’ le permitirá monitorear a todos los bovinos desde su nacimiento. Obtenido de <https://www.agronegocios.co/ganaderia/el-software-animal-le-permitira-monitorear-a-todos-los-bovinos-desde-su-nacimiento-3069930#:~:text=A%20trav%C3%A9s%20de%20la%20herramienta,de%20salud%2C%20alimentaci%C3%B3n%20y%20sacrificio.>
- Contexto ganadero. (2016). 5 sensores que monitorean el comportamiento de las vacas. Obtenido de <https://www.contextoganadero.com/internacional/5-sensores-que-monitorean-el-comportamiento-de-las-vacas>
- Rohkus. (2020). 9 niveles de madurez de la tecnología TRLs. Obtenido de <https://www.gestionfondosmexico.mx/single-post/2016/07/22/niveles-de-madurez-de-la-tecnolog%C3%ADa-trl#:~:text=El%20nivel%20TRL%20es%20una,no%20s%C3%B3lo%20para%20proyectos%20espaciales.>
- TRL. (2020). TECHNOLOGY READINESS LEVELS – TRL. Obtenido de http://investigacion.manizales.unal.edu.co/fileadmin/recursos/direcciones/investigacion_manizales/docs/Convocatorias_Internas/Anexo_1_TRL.pdf
- Sparklers. (2019). Use Neo 6M GPS Module with Raspberry Pi and Python. Obtenido de <https://sparklers-the-makers.github.io/blog/robotics/use-neo-6m-module-with-raspberry-pi/>
- Raspberry. (2019). Raspberry pi 3 b plus. Obtenido de <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/raspberry-pi-3-b-plus/>
- SnGular. (2008). CRISP-DM: La metodología para poner orden en los proyectos. Obtenido de <https://www.sngular.com/es/data-science-crisp-dm-metodologia/>
- Data Science. (2019). Understanding the OLS method for Simple Linear Regression Obtenido de <https://towardsdatascience.com/understanding-the-ols-method-for-simple-linear-regression-e0a4e8f692cc>
- Ciencia de datos. (2020). Regresión Lineal en Python. Obtenido de <https://www.cienciadedatos.net/documentos/py10-regresion-lineal-python.html>
- Yasothai R. 2014. Importance of energy on reproduction in dairy cattle, International Journal of Science and Technology. Vol. 3 (6), pp. 2020 – 2023.

