

Universidad Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación
Efecto de la variabilidad y el cambio climático en los
patrones de producción de leche en la finca Hacienda La Esmeralda,
Boquete, Panamá

Estudiante
Henry Nahir Caballero Elizondro

Asesores
Diego Obando, M.Sc.
Alexandra Manueles, Mtr.

Honduras, agosto 2025

KEITH ANDREWS

Rector i.a.

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

VICTORIA CORTÉS MATAMOROS

Directora del Departamento de Ambiente y Desarrollo

JULIO NAVARRO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros	5
Índice de Figuras	6
Índice de Anexos	8
Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
Metodología	14
Descripción del Sitio de Estudio	14
Diseño de Estudio	15
Caracterización Biofísica de las Fincas	15
Análisis De Variables Climáticas y Productivas	16
Fuente de Datos Meteorológico y Productivos	16
Preprocesamiento de Datos de Reanálisis	17
Preprocesamiento de Datos Meteorológicos y productivos observados	18
Análisis Estadísticos	19
Simulación De Los Impactos Del Cambio Y La Variabilidad Climática	20
Generación de escenarios climáticos a partir de datos históricos y proyectados	20
Revisión De Literatura Sobre Factores No Climáticos En La Producción Lechera	21
Resultados y Discusión	23
Caracterización Biofísica del Área de Estudio	23
Sistema de Producción y Manejo	23
Ubicación y Relieve	25
Características de Suelo	26
Disponibilidad Hídrica	27

Vegetación	28
Cobertura de Suelo	29
Análisis De La Influencia Climática Sobre El Rendimiento Lechero	30
Series de Datos Climáticos	30
Serie de Producción de Leche	36
Correlación entre Clima y Producción de leche	37
Correlación con Datos Observados.....	37
Correlación con Datos de Reanálisis	38
Comparativa entre Observados y Reanálisis.....	40
Simulación del impacto climático proyectado en la producción lechera bajo escenarios futuros	42
Escenarios Climáticos.....	42
Recomendaciones de Manejo.....	47
Fortalecer el Manejo de la Salud Podal	47
Optimizar el Manejo de Pastoreo Rotativo	47
Mejora del Sistema Silvopastoril	48
Mejora Genética con un Enfoque a la Resiliencia.....	49
Monitoreo Agroclimático.....	50
Mejorar la Cultura del Registro.....	50
Conclusiones	52
Recomendaciones.....	53
Referencias.....	54
Anexos.....	59

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Criterios de interpretación del coeficiente de correlación de Pearson según Belizario-Quispe (2015).....	20
Cuadro 2 Características biofísicas y de manejo de las fincas de la Hacienda La Esmeralda.	24
Cuadro 3 Fuente de abastecimiento y uso del agua en las fincas de la zona de estudio.	28
Cuadro 4 Coberturas del suelo identificadas según nomenclatura CLC2018.	30
Cuadro 5 Estadísticos descriptivos de las variables climáticas registradas por la estación meteorológica Boquete-108053 (2015–2024).	31
Cuadro 6 Estadísticos descriptivos de las variables climáticas obtenidas por reanálisis (2015–2024).	31
Cuadro 7 <i>Estadísticos descriptivos de las variables de producción lechera (2015–2024)</i>	36
Cuadro 8 Factores no climáticos influyentes en la producción lechera.	46
Cuadro 9 Prácticas de adaptación frente a la variabilidad y el cambio climático en sistemas lecheros.	51

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de localización de fincas y estaciones meteorológicas en Boquete, Chiriquí, Panamá	14
Figura 2 Filtro de control de calidad aplicados a las bases de datos meteorológicas.	18
Figura 3 Ejemplares de las razas Holstein y Jersey presentes en las fincas evaluadas.....	23
Figura 4 Producción mensual promedio de leche por finca (2015-2024).....	24
Figura 5 Evaluación organoléptica de la textura de suelos en las fincas lecheras.....	26
Figura 6 Delimitación de las áreas de uso agrícola en las fincas de la Hacienda La Esmeralda.....	27
Figura 7 Presencia de especies arbóreas nativas en las áreas de pastoreo de las fincas	29
Figura 8 Temperatura Mínima °C, Promedio °C y Máxima °C de Datos Observados (2015-2024).....	32
Figura 9 Precipitación de Datos Observados (2015-2024).....	33
Figura 10 Temperatura Mínima °C de Datos de Reanálisis (2015-2024).	34
Figura 11 Temperatura Máxima °C de Datos de Reanálisis (2015-2024).	34
Figura 12 Precipitación (mm) de Datos de Reanálisis (2015-2024).	35
Figura 13 Comparación de datos observados con datos de reanálisis de las fincas PGG.....	36
Figura 14 Producción mensual promedio de leche por vaca en las fincas de la Hacienda La Esmeralda (2015-2024).....	37
Figura 15 Mapa de Calor: Coeficientes de correlación entre variables climáticas y producción de leche utilizando datos observados (2015-2024)	38
Figura 16 Mapa de calor: Coeficientes de correlación entre variables climáticas y producción de leche utilizando datos de reanálisis (2015-2024).....	40
Figura 17 Mapa de Calor: Comparación de los coeficientes de correlación entre datos observados y datos de reanálisis para variables climáticas y producción de leche. (2015-2024).....	42
Figura 18 Comparación entre el Índice Multivariado ENSO (MEI) y la precipitación de datos observados y de reanálisis.....	43

Figura 19 Estimaciones de la producción de leche bajo diferentes escenarios de cambio climático en función de las variables temperatura mínima y máxima en dos años análogos contrastantes 2015 (Niño) y 2022 (Niña)..... 45

Índice de Anexos

Anexo A Consulta de datos climáticos mediante la plataforma digital “Climate Engine”	59
Anexo B Ficha de campo para la caracterización biofísica de las fincas evaluadas	60
Anexo C Instrumento de percepción aplicado a trabajadores de las fincas evaluadas.....	67
Anexo D Preprocesamiento de revisión y tratamiento de datos climáticos faltantes	68
Anexo E Extracción de información climática desde la plataforma “Climate Knowledge Portal”	69

Resumen

El estudio evaluó el efecto de la variabilidad y el cambio climático sobre los patrones de producción de leche en La Hacienda La Esmeralda, ubicada en los municipios de Boquete y Dolega, Chiriquí, Panamá. Se aplicó un enfoque cuantitativo, exploratorio y correlacional, utilizando datos históricos de producción lechera, series climáticas observadas de la estación meteorológica Boquete-108053 y datos de reanálisis obtenidos del producto TerraClimate, en una serie de tiempo comprendida entre 2015 al 2024. Mediante un análisis de correlación se identificaron asociaciones entre variables climáticas (temperatura mínima, promedio, máxima, precipitación, viento, radiación y humedad) y la producción lechera. A pesar de las correlaciones observadas y de ciertas tendencias con eventos climáticos como El Niño y La Niña, no se evidenció una tendencia general sostenida durante todo el periodo analizado. Las correlaciones, aunque altas y muy altas en algunos casos, no fueron lo suficientemente consistentes como para establecer una relación determinante con la variación en la producción. Sin embargo, variables como la precipitación, el viento y la temperatura máxima presentaron altas correlaciones en años y fincas específicas. El Índice Multivariado ENSO (MEI) permitió identificar años análogos relevantes para estas proyecciones. Las simulaciones de cambio climático bajo el escenario CMIP6 SSP5–8.5 proyectaron una disminución sostenida en la producción hacia 2040, 2060 y 2080. Este estudio respalda la necesidad de fortalecer las acciones de adaptación del sistema lechero en Chiriquí, Panamá.

Palabras clave: Correlación, estación meteorológica, ganadería y modelo climático

Abstract

The study evaluated how climate variability and change affect milk production patterns at Hacienda La Esmeralda, located in Boquete and Dolega municipalities of Chiriquí, Panama. A quantitative, exploratory, and correlational approach was applied, using historical milk production data, observed climate series from the Boquete-108053 meteorological station, and reanalysis data obtained from the TerraClimate product, covering the time series from 2015 to 2024. Through a correlation analysis, associations were identified between climatic variables (minimum, average, and maximum temperature; precipitation; wind; radiation; and humidity) and milk production. Despite the observed correlations and some trends with climate events such as El Niño and La Niña, no general sustained trend was evident throughout the analyzed period. Although, the correlations were high and very high in some cases, they were not consistent enough to establish a definitive relationship with production variability. However, variables such as precipitation, wind, and maximum temperature showed strong correlations in specific years and farms. The Multivariate ENSO Index (MEI) was used to identify relevant analogous years for these projections. Climate change simulations under the CMIP6 SSP5–8.5 scenario projected a sustained decline in production toward 2040, 2060, and 2080. This study supports the need to strengthen adaptation measures within the dairy production system in Chiriqui, Panama.

Keywords: Climate model, correlation, livestock farming, weather station

Introducción

El cambio climático está causando desafíos importantes en la capacidad del mundo para satisfacer las necesidades de seguridad alimentaria y nutricional, que aumentarán a gran medida en el futuro (Lobell et al., 2008; Tirado et al., 2010). Las proyecciones demográficas indican que la población mundial podría alcanzar los 9,700 millones de personas para 2050, lo que plantea desafíos significativos para garantizar la seguridad alimentaria y preservar la salud global (United Nations [UN], 2015).

En América Latina y el Caribe (ALC), los eventos climáticos son desafíos que están estrechamente relacionados con la pobreza y la seguridad alimentaria (Kopittke et al., 2019); de esta manera se ha generado un complejo vínculo que interactúa entre sí, comprometiendo la producción de alimentos, debido a que deteriora los suelos y reduce tanto la disponibilidad como el ingreso económico, lo que finalmente termina poniendo en riesgo la seguridad alimentaria (F. J. Fernández et al., 2019; Vargas et al., 2018). Tal como dijo Lobell et al. (2011), mitigar los efectos del cambio climático sobre la seguridad alimentaria representa uno de los retos más significativos que enfrenta la humanidad en el siglo XXI.

El cambio climático, la agricultura y la nutrición están interconectados. Las alteraciones climáticas y su variabilidad influyen en los patrones de temperatura y precipitación, además de incrementar la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos (Fanzo et al., 2018). Esto provoca una mayor incertidumbre al intentar predecir el clima con certeza, y es evidente que estas incertidumbres no van a desaparecer en las próximas décadas (Heal y Millner, 2014). Según una encuesta de la Percepción de Riesgos Globales (GRPS) clasificaron el “fracaso de la acción climática” como una de las mayores amenazas para el futuro del planeta y con las catástrofes potenciales más graves para los próximos años (The World Economic Forum [WEF], 2022).

Fanzo et al. (2018), confirman que la sociedad está experimentando las consecuencias del cambio climático, mismas que, de no ser abordadas mediante acciones de mitigación y adaptación, se

agravarán con el tiempo. Esto afectará una línea de producción importante para la seguridad alimentaria. En este caso cada cadena de valor de la producción de leche, estará siendo amenazada por el cambio y variabilidad climática (Gauly y Ammer, 2020).

Por ejemplo, según un análisis elaborado por Cowley et al. (2015), la producción de leche como sus componentes se verán afectados por continuas olas de calor de manera que tendrán un efecto directo en la calidad y cantidad en los productos lácteos. Estas irregularidades en la producción impactan directamente en la seguridad alimentaria mundial debido a su importante pilar en la alimentación. Recalcando que los productos lácteos desempeñan un papel clave en la nutrición humana, posicionándose como la quinta fuente más importante de energía y la tercera en cuanto a aporte de proteínas y grasas a nivel mundial (Bennett et al., 2013). Tal como dicen Gauly y Ammer (2020), como resultado, el cambio climático generará repercusiones económicamente significativas en la industria láctea, afectando así la nutrición a nivel global.

Estos efectos negativos en la producción de alimentos lácteos van asociados a los efectos adversos que padece el ganado lechero en las condiciones actuales. La influencia de las condiciones ambientales y, a su vez, el clima y el cambio climático, están directamente asociados con el concepto de estrés por calor (Katsini et al., 2024), cambiando por completo las condiciones de confort del ganado y su producción diaria de leche. Las vacas en periodo de lactancia comienzan a experimentar estrés térmico cuando las temperaturas ambientales superan aproximadamente los 25 °C (Lees et al., 2018; Lees et al., 2019). Sin embargo, las continuas olas de calor provocan que las temperaturas superen el umbral óptimo.

Además, según Kadokawa et al. (2012), el estrés térmico influye negativamente en la fertilidad del ganado, manifestándose en un incremento de los días abiertos, disminución de la fertilidad debido al anestro y menores tasas de concepción. No obstante, no solo se considera la temperatura como un factor del clima que induce el estrés térmico en el ganado. Cada que aumenta la temperatura ambiente, la vaca produce termorregulación por medio de evaporación, sin embargo, la humedad

relativa afecta este proceso , además de este factor, hay más influyentes como velocidad del viento y la radiación solar (Katsini et al., 2024). Por otro lado, también es probable que los cambios en los patrones de temperatura y precipitación expongan a los animales a micotoxinas y alimentos contaminados, ya que los climas húmedos y cálidos pueden fomentar la contaminación y el crecimiento de toxinas (Sejian et al., 2021).

En Panamá, la producción lechera es una actividad económica importante, particularmente en regiones frías de Chiriquí como lo es Boquete, sin embargo, el cambio en el clima podría estar afectando directamente la productividad ganadera. Como se presentó anteriormente, las condiciones climáticas tienen un efecto en la capacidad del ganado para producir leche en condiciones normales. Para prepararse y disminuir las consecuencias negativas en caso de cambios drásticos, es fundamental comprender cómo estos factores meteorológicos están afectando la producción lechera. Tal como lo demostraron Katsini et al. (2024), usar correlaciones entre datos climáticos y productivos les permitió analizar con mayor precisión la influencia de las variables ambientales sobre la producción lechera, aportando información sólida para el diseño de estrategias de adaptación frente al cambio climático.

Por lo que, con el uso de herramientas estadísticas, correlacionando datos históricos de producción y de clima, se crearán escenarios climáticos. Los resultados podrán facilitar la toma de decisiones e implementación de medidas adaptativas que garanticen la sostenibilidad de la producción lechera a largo plazo. Consecuentemente, el propósito de esta investigación es correlacionar variables meteorológicas y de productividad para simular el impacto del cambio climático en la producción lechera en la finca Hacienda La Esmeralda, Boquete, Panamá, con los siguientes objetivos específicos: a) Comparar las características biofísicas de ocho fincas lecheras con el fin de contextualizar integralmente las unidades de estudio. b) Identificar las variables climáticas con mayor influencia en las fluctuaciones del rendimiento de la producción lechera. c) Simular los impactos del cambio y la variabilidad climática en la producción lechera en los próximos 30 años en la finca Hacienda La Esmeralda, Boquete, Panamá.

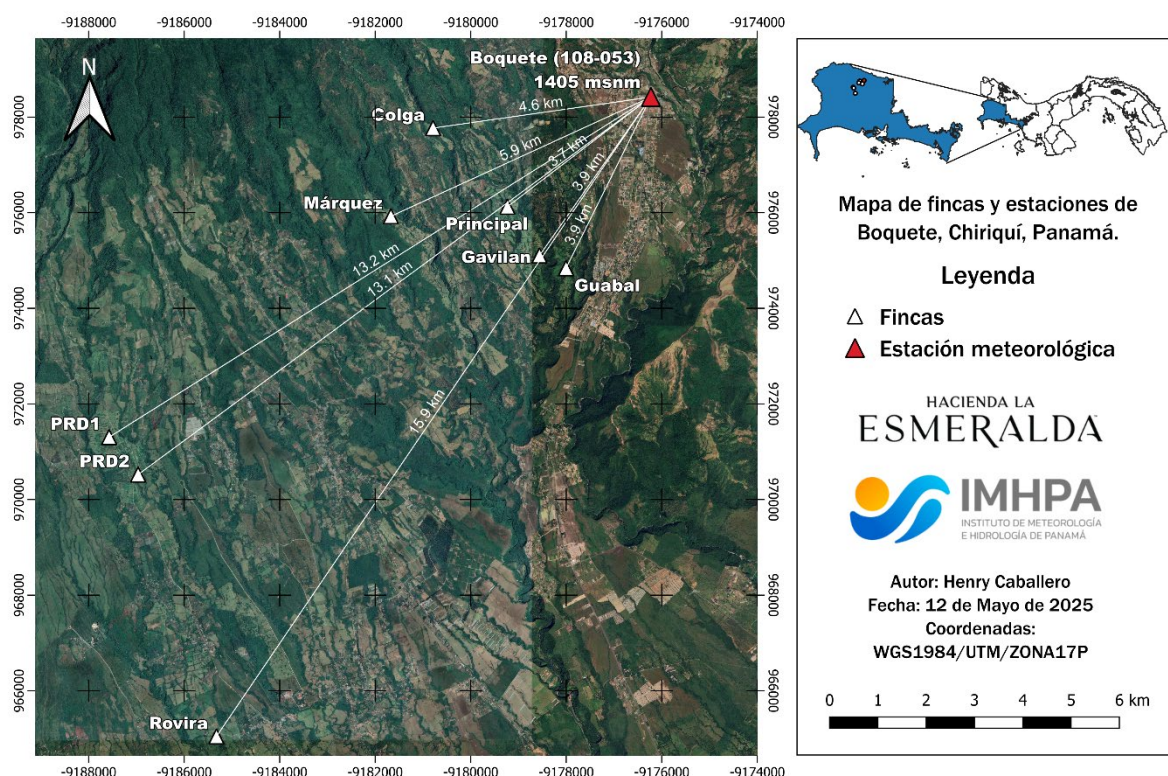
Metodología

Descripción del Sitio de Estudio

Para este estudio se seleccionaron un total de 8 fincas lecheras de la Hacienda La Esmeralda, de las cuales, la mayoría se ubican en el distrito de Boquete, mientras que el resto pertenece al distrito de Dolega, ambos localizados en la provincia de Chiriquí, Panamá (Figura 1). Boquete se encuentra en una región de montaña con elevaciones que oscilan entre los 1,000 y 1,800 msnm, con temperaturas promedio cercanas a los 20 °C y precipitaciones anuales que pueden superar los 3,000 mm. En cambio, el distrito de Dolega se ubica en una zona de transición altitudinal más baja, con terrenos que varían entre los 300 y 1,100 msnm, con temperaturas medias anuales cercanos a 25 °C y una precipitación anual aproximada de 1,700 mm.

Figura 1

Mapa de localización de fincas y estaciones meteorológicas en Boquete, Chiriquí, Panamá



Diseño de Estudio

El diseño de investigación es de enfoque cuantitativo, el alcance es de tipo exploratorio y correlacional. Debido que no se manipulan las variables es cuasiexperimental. Se utilizaron series de datos climáticos históricos. La hipótesis es direccional y correlacional planteando que a medida que se presentan variaciones climáticas significativas éstas tienen un efecto en el rendimiento de la producción lechera en la finca Hacienda La Esmeralda Boquete, Panamá. La relación causal es bivariado, ya que se analizan las relaciones directas entre dos variables, meteorológicas (VI) y la producción de leche (VD).

Es importante señalar que el alcance de esta investigación se limita al análisis de la relación entre variables meteorológicas y productivas, sin considerar otros factores de influencia.

Caracterización Biofísica de las Fincas

La selección de los componentes biofísicos evaluados y la estructura general de este apartado metodológico fueron adaptadas del estudio realizado por E. Fernández et al. (2011), donde se caracterizó cada finca mediante visitas de campo, guiadas por el gerente encargado de la producción lechera de todas las fincas, quien brindó la información clave sobre el manejo e historial productivo que fueron documentadas en fichas de campo (Anexo B). Durante las visitas se identificaron directamente elementos esenciales del sistema productivo para la caracterización biofísica como el tipo de pasto predominante, las razas bovinas presentes y el sistema de manejo que usan.

La ubicación política y geografía de cada finca fue georreferenciada utilizando la aplicación “Global Position System”, (GPS, por sus siglas en inglés) y plataformas digitales como “Google Maps®”. Las coordenadas de la finca se registraron tomando como punto de referencia a la lechería. El área de uso agrícola se delimitó utilizando el “software Quantum Geographic Information System” (QGIS®, por sus siglas en inglés) a partir de las imágenes satelitales y con el apoyo del gerente de lechería para validar los límites de las unidades productivas.

La fisiografía y relieve se identificaron mediante observación directa en campo considerando las formas del terreno visible (colinas, mesetas, pendientes suaves, etc.). Por otro lado, se incluyó la estimación de la altitud (msnm) mediante una aplicación altimétrica digital llamada Altímetro[®]. Se estimó la textura del suelo por el método táctil-manual en distintos puntos de la finca. Esta técnica permite identificar la textura basándose en las propiedades sensoriales como la granulometría, plasticidad y la cohesión de la muestra sin recurrir a análisis de laboratorio. Para la caracterización hídrica, en primer lugar, se identificaron los cuerpos de agua tales como ríos y quebradas. Se le consultó al gerente sobre que uso le daban y como la extraían. Esto permitió caracterizar el acceso hídrico disponible.

La identificación de la vegetación presente en las fincas se realizó mediante observaciones directas en campo con apoyo del personal de las fincas y el gerente de lechería, quién indicó qué especies arbóreas eran autóctonas y cuales habían sido introducidas mediante prácticas de manejo. Para la identificación de las coberturas de uso del suelo presentes en la finca, se utilizó como base la nomenclatura del “CORINE Land Cover” por sus siglas en inglés (CLC2018), desarrollada por el programa “Land Copernicus” del “European Environment Agency” (Kosztra et al., 2019).

Con base a la observación directa en la visita de campo, entrevistas semiestructuradas con actores clave (gerente de lechería y personal de campo) (Anexo C) y el resultado de los análisis de correlación, se formularon, recomendaciones orientadas a la mejora del sistema productivo considerando prácticas de adaptación climática. Este proceso tomó un enfoque de diagnóstico participativo y triangulación de información mediante evidencia empírica, conocimiento local y resultados estadísticos.

Análisis De Variables Climáticas y Productivas

Fuente de Datos Meteorológico y Productivos

El estudio se realizó a partir de datos climáticos de reanálisis, datos meteorológicos observados y datos de producción de leche. Los datos climáticos de reanálisis tales como temperatura

mínima, máxima, precipitación, radiación y velocidad del viento, fueron obtenidos de la plataforma “Climate Engine” con información del producto TerraClimate. Los datos observados de temperatura mínima, máxima y promedio, precipitación, humedad y viento fueron registrados por la estación meteorológica tipo c automática Boquete-108053 del Instituto de Meteorología e Hidrológico de Panamá (IMHPA) ubicada en el distrito de Boquete. Los datos de producción lechera corresponden a registros de la producción promedio mensual de leche por vaca de cada finca, información proporcionada por La Hacienda La Esmeralda. Los 3 tipos de datos fueron manejados en el mismo plazo de tiempo, desde el 2015 al 2024.

Preprocesamiento de Datos de Reanálisis

Para la obtención de los datos climáticos de las fincas evaluadas se utilizó el producto TerraClimate el cual proporciona información mensual a escala global mediante reanálisis climático. Este integra datos de alta resolución espacial provenientes de la plataforma “WorldClim”, junto con series temporales del producto CRU Ts4.0 (“Climatic Research Unit Data Sets Version 4”) y la reanálisis atmosférica de largo plazo JRA55 (“Japanese 55-year Reanalysis”). A partir de estas fuentes, se calculan diversas variables climáticas mediante un modelo simplificado de balance hídrico, basado en una versión modificada del método de Thornthwaite-Mather, que considera parámetros como precipitación, evapotranspiración potencial (estimada mediante Penman-Monteith), contenido de humedad del suelo y almacenamiento de nieve (Degano y Rivas, 2023).

Además, este producto incluye otras variables relevantes para el análisis como temperatura, precipitación, viento y radiación solar. Este conjunto de datos ha sido ampliamente utilizado en estudios hidrológicos y ecológicos debido a su cobertura espacial y temporal extensa (Abatzoglou et al., 2018).

Los datos fueron descargados mediante la plataforma Climate Engine, una herramienta que permite visualizar, procesar y extraer variables climáticas específicas según productos satelitales y coordenadas geográficas. En este caso, la localización de cada finca fue determinada manualmente a

través de la visualización del mapa interactivo, y se seleccionó un único punto representativo por finca. Una vez definida cada ubicación mediante la herramienta “Make Graph”, se procedió a elegir el producto TerraClimate y las variables de interés como precipitación mensual, temperatura máxima y mínima, viento y radiación, junto con el rango de tiempo correspondiente. Posteriormente, se generaron las series temporales (“get time series”) y se descargaron en formato tabular para facilitar su tratamiento estadístico y análisis (Degano y Rivas, 2023).

Debido a la resolución de 4 km del producto TerraClimate, algunas fincas compartían el mismo clima. Las fincas Principal, Guabal y Gavilán presentaron datos iguales, al igual que las fincas Colga y Márquez, así como PRD1 y PRD2. Por lo que para evitar redundancias y asegurar la precisión del análisis, las fincas se agruparon según la misma información climática.

Preprocesamiento de Datos Meteorológicos y productivos observados

Para el procesamiento de los datos primero se realizó un control de calidad de la información de la estación Boquete-108053 en “Microsoft Excel®” y se le aplicó un filtrado por colores para identificar los datos faltantes (Figura 2). Posteriormente, se le realizó limpieza y transformación de la información meteorológica de la estación con el fin de homogenizar los datos. Lo anterior se debe realizar en caso de que los datos presenten formatos distintos, unidades diferentes y otros detalles de alineación temporal, buscando que los datos sean representativos de las condiciones climáticas de la zona de estudio.

Figura 2

Filtro de control de calidad aplicados a las bases de datos meteorológicas.

Color amarillo	•Días con datos faltantes.
Color morado	•Meses con datos faltantes.
Color celeste	•Años con datos faltantes.

Nota. Adaptado de *Series de precipitación y temperatura en Zamorano: tendencias, proyección y relación con el cambio climático*, por Hernández Castro (2021)

Por otro lado, a la base de datos de producción de leche se le aplicó un análisis de valores atípicos, para ello se generaron gráficos "boxplots" y luego se eliminaron estos valores si se confirma con el gerente de la lechería si es un dato extraño. Finalmente, se obtuvo una base de datos de producción en litros promedio por vaca al mes para un periodo de 9 años. Finalmente, se realizó una prueba de Shapiro-Wilk para las variables meteorológicas y de producción observadas con el fin de evaluar la normalidad de los datos. Con ello, la base de datos quedó lista para los demás análisis estadísticos.

Análisis Estadísticos

Con el fin de tener una correcta validez en las comparaciones, se estableció que todas las fincas evaluar debían contar con la misma cantidad de años de datos continuos. Debido a esto, se descartaron las fincas Márquez, Rovira y PRD2, los cuales tienen pocos años de registros p . Para determinar la relación que existe entre las variables climáticas y la producción de leche se realizaron pruebas de correlación con el fin de identificar el grado de asociación entre las variables. Este tipo de análisis ha sido utilizado en estudios recientes como el de (Katsini et al., 2024), quienes modelaron los efectos climáticos sobre la producción lechera. La correlación de Pearson (valores r) simple expresada en la Ecuación 1 se calculó para evaluar la relación lineal que hay entre los datos y fueron interpretados conforme al Cuadro 1, utilizando los criterios o tipos de correlación según los valores r (Belizario-Quispe, 2015).

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad [1]$$

Donde:

x = representa las variables climáticas

Y = representa la producción de leche

n = representa el número de observaciones

Cuadro 1

Criterios de interpretación del coeficiente de correlación de Pearson según Belizario-Quispe (2015).

Tipo de correlación	Valores r
(+) (-) Correlación inexistente	$0.00 \leq r < 0.00$
(+) (-) Correlación muy baja	$0.01 \leq r < 0.2$
(+) (-) Correlación baja	$0.21 \leq r < 0.4$
(+) (-) Correlación moderada	$0.41 \leq r < 0.6$
(+) (-) Correlación alta	$0.61 \leq r < 0.8$
(+) (-) Correlación muy alta	$0.81 \leq r < 0.99$
(+) (-) Correlación perfecta	$1.00 \leq r < 1.00$

Simulación De Los Impactos Del Cambio Y La Variabilidad Climática***Generación de escenarios climáticos a partir de datos históricos y proyectados***

Para identificar patrones entre las variables climáticas y la producción de leche promedio por vaca se aplicó una regresión lineal simple explicado en la Ecuación 2 por cada variable y así observar las tendencias. Esta técnica ha sido utilizada por autores como West (2003), quien analizó la influencia del estrés térmico en la producción lechera.

$$y = mx - b \quad [2]$$

Donde:

x = representa las variables climáticas

Y = representa la producción de leche

m = representa la pendiente

b = es la intersección en el eje y

Las tendencias permiten observar posibles irregularidades en las condiciones climáticas y su posible correlación con las variaciones ocurridas en la producción de leche a lo largo del tiempo. Con las líneas de tendencia se obtuvieron las ecuaciones a utilizar en las proyecciones o escenario climáticos.

Realizadas las correlaciones y el análisis de regresión, se aplicó el modelo de escenario climático denominado “Coupled Model Intercomparison Project Phase 6” (CMIP6) bajo el “Shared Socioeconomic Pathway 5” con un forzamiento radiativo final de 8.5 W/m^2 (SSP5-8.5) para evaluar el impacto del cambio climático en el futuro. Los datos fueron obtenidos del “Climate Change Knowledge Portal” del Banco Mundial (*World Bank Climate Change Knowledge Portal*, 2025) (Anexo E), específicamente en la sección de proyecciones climáticas para Panamá. Esta plataforma o portal actúa como distribuidor y visualizador accesible de los datos climáticos modelados por el IPCC, ya que este, no proporciona directamente los archivos al público, mientras que el portal del Banco Mundial permite una visualización intuitiva y descarga simplificada de datos modelados (Anexo D).

El uso de los datos de escenarios climáticos es comúnmente empleado en estudios de proyección climática con base en escenarios de altas emisiones, como lo hicieron Hausfather y Peters (2020). Al usar estos escenarios se debe incorporar el método de suma del delta de anomalías climáticas, técnica ampliamente usada en estudios de cambio climático (Ramírez Villegas y Jarvis, 2010). Las diferencias que observamos entre clima histórico y el clima futuro estimados por el modelo acoplado del CMIP6 SSP5-8.5, se suma a los valores de clima históricos de la zona de estudio para generar escenarios de cambio climático. El modelo CMIP6 permite ajustar las proyecciones climáticas globales a las condiciones locales de producción lechera bajo altas emisiones (Ramírez Villegas y Jarvis, 2010).

Revisión De Literatura Sobre Factores No Climáticos En La Producción Lechera

Si bien este análisis se centra exclusivamente en la relación entre variables climáticas y producción de leche, es importante reconocer que existen otros factores no climáticos que también inciden significativamente en la productividad bovina a largo plazo. Por lo que, con el fin de identificar otros factores que afectan la producción lechera en bovinos, respaldados por información científica, se llevó a cabo una revisión de literatura mediante una estrategia de búsqueda estructurada. La consulta se realizó a través del motor académico “Google Scholar”, priorizando artículos disponibles

en bases de datos reconocidas como “ScienceDirect”, “SpringerLink” y el “*Journal of Dairy Science*”. Para guiar la búsqueda se utilizaron palabras clave en inglés enfocadas en la temática, tales como: “factors affecting milk production”, “determinants of milk yield in dairy cows”, “influences on milk yield”, “milk production limiting factors”, y “non-environmental factors dairy production”. La selección se basó en la pertinencia temática, el enfoque productivo y la actualidad de los documentos, considerando únicamente artículos científicos publicados entre 2015 y 2025 en idioma inglés o español. Inicialmente se identificaron 35 artículos mediante bases de datos académicas; tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se revisaron detalladamente 18 artículos, de los cuales 10 fueron incluidos en la revisión final.

Resultados y Discusión

Caracterización Biofísica del Área de Estudio

Sistema de Producción y Manejo

Se evaluaron ocho fincas pertenecientes a la Hacienda La Esmeralda llamadas Principal, Guabal, Gavilán, Colga, Márquez, PRD1, PRD2 y Rovira (Cuadro 2). Las cuales tienen un sistema de producción basado en pastoreo intensivo, donde el principal recurso alimenticio del ganado es el pasto disponible en los potreros. Este tipo de sistema permite alimentación natural, donde de manera rotativa se mueven entre potreros para asegurar la regeneración de las áreas de pastoreo, optimizando el aprovechamiento forrajero y la productividad animal (Pulido y Leaver, 2003). Se identificó a la raza Holstein (Figura 3 a.) como la única raza en 7 de las 8 fincas, como la raza de mayor producción de leche en climas frescos (Oltenucu y Broom, 2010). Por otro lado, solo la finca de Rovira tiene combinación de razas entre Holstein y Jersey. Según E. Caballero (Comunicación personal, Diciembre 2024), esto se realizó con el propósito de producir más leche en zonas cálidas, sin embargo, no dio los resultados esperados y esta raza pura se discontinuará de la finca (Figura 3 b.).

Figura 3

Ejemplares de las razas Holstein y Jersey presentes en las fincas evaluadas.



Vacas Holstein de la finca Márquez.



Vacas Jersey de la finca Rovira.

En el Cuadro 2 se muestra el resumen de características biofísicas, misma que más adelante se describen.

Cuadro 2

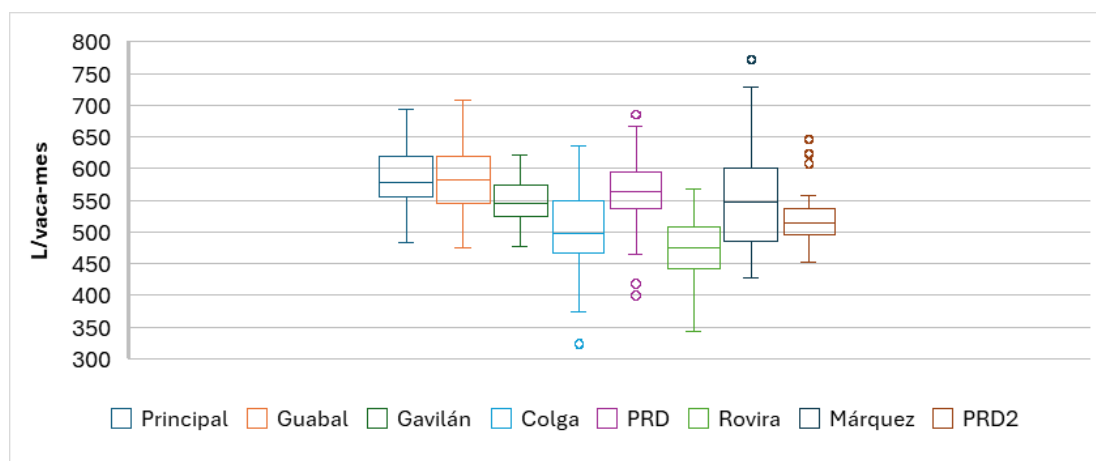
Características biofísicas y de manejo de las fincas de la Hacienda La Esmeralda.

Ubicación	Finca	Área (Ha)	Altura (msnm)	Vacas en ordeño	Raza	Sistema de manejo	Cobertura
Palmira, Boquete	Gavilán	43	981	95	Holstein	Pastoreo	Estrella
Palmira, Boquete	Guabal	68	982	100	Holstein	Pastoreo	Estrella
Palmira, Boquete	Principal	62	1,048	137	Holstein	Pastoreo	Estrella
Palmira, Boquete	Márquez	44	1065	98	Holstein	Pastoreo	Estrella
Palmira, Boquete	Colga	40	1,266	78	Holstein	Pastoreo	Estrella
Rovira, Dolega	PRD1	96	1,045	274	Holstein	Pastoreo	Estrella
Rovira, Dolega	PRD2	109	956	135	Holstein	Pastoreo	Estrella
Rovira, Dolega	Rovira	70	684	170	Holstein y Jersey	Pastoreo	Vacarí

En complemento a lo anterior, la Figura 4 presenta los volúmenes de producción de leche alcanzados por las fincas durante el periodo 2015-2024, reflejando la capacidad productiva asociada a las razas y sistemas de manejo implementados. La producción de leche en las fincas oscila entre 300 a cerca 800 L/mes en el periodo 2015 -2024.

Figura 4

Producción mensual promedio de leche por finca (2015-2024).



La pastura es clave en este tipo de sistema de manejo, donde se identificó las especies predominantes como el pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) y pasto vacarí (*Axonopus catarinensis*). El pasto Estrella es generalmente usado en el área de ganado lechero debido a su resistencia al pastoreo intensivo y su capacidad de rebrote rápido, lo que le confiere alta versatilidad y productividad. En otras zonas tropicales como Costa Rica, este pasto se establece incluso en potreros pequeños y se adapta bien a esquemas de rotación forrajera (Solano Lopez y Villalobos Villalobos, 2024). Por otro lado, el pasto vacarí no es tan usado, su función es proporcionar una alternativa de alimentación en zonas específicas.

El tamaño del hato productivo varía entre las fincas, oscilando entre 78 y 274 vacas, lo que refleja diferencias en la capacidad de carga y en la extensión territorial de cada unidad de producción. Por ejemplo, la finca PRD1 presenta la mayor cantidad de vacas en ordeño con 274 vacas y Colga con la menor cantidad con 79 vacas. El número de vacas se revisó el 28/12/2024.

Ubicación y Relieve

Las fincas analizadas se encuentran distribuidas en dos distritos de la provincia de Chiriquí. En el distrito de Palmira, Boquete, se ubican las fincas Gavilán, Guabal, Márquez y Colga; mientras que, en el distrito de Rovira, Dolega, se localizan las fincas Rovira, PRD1 y PRD2.

Existe una diferencia notable entre ambos distritos evidenciada principalmente en las características del relieve, observaciones que se anotaron en la ficha de campo (Anexo B). En el corregimiento de Palmira del distrito de Boquete se caracteriza por un terreno que aparenta ser colinario, con ondulaciones suaves a moderadas y pendientes variables, por otro lado, el corregimiento de Rovira en el distrito de Dolega es lo contrario, las fincas están establecidas en terrenos planos o ligeramente ondulados.

En altitud, las fincas varían entre 684 y 1,266 metros sobre el nivel del mar (msnm). Colga es la finca con mayor elevación, estas características del terreno son determinantes de la temperatura y disponibilidad de humedad para crecimiento del pasto.

Características de Suelo

Se realizaron las estimaciones de la textura del suelo por el método táctil-manual (Figura 5) que indicaron que la mayoría de las fincas presentan una textura predominante de franco arenoso (fr.ar.) con algunas variaciones de franco limoso (fr.li.) en ciertas zonas. La textura del suelo es un factor que determina en gran medida el crecimiento de las pasturas y el drenaje de agua. Suelos franco-arenosos permiten un mayor movimiento del agua en el perfil lo que facilita su infiltración y reduciendo la acumulación superficial, lo que resulta beneficioso para la ganadería. En cambio, los suelos franco-limosos tienden a ralentizar el flujo del agua hacia capas más profundas, reteniéndola por más tiempo y generando condiciones más húmedas (Li et al., 2021), aunque esta textura fue poco observada en el área de estudio.

Figura 5

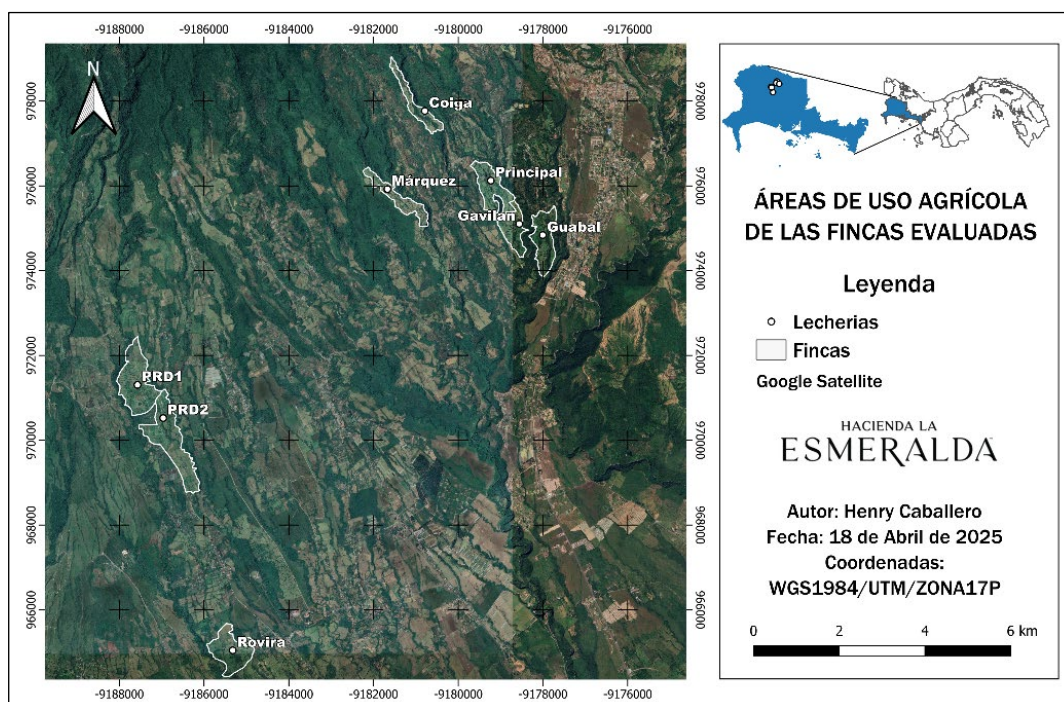
Evaluación organoléptica de la textura de suelos en las fincas lecheras.



La superficie de uso agrícola de cada finca varía entre ~39.97 a ~109.08 ha, siendo la finca PRD2 y PRD1 las más grandes, y la de Colga la de menor extensión como se puede observar en la Figura 6.

Figura 6

Delimitación de las áreas de uso agrícola en las fincas de la Hacienda La Esmeralda.



Disponibilidad Hídrica

Las fincas evaluadas obtienen su abastecimiento hídrico a partir de fuentes naturales superficiales como se muestra en el Cuadro 3. Según el gerente, el agua es conducida mediante un sistema de toma directa hacia las lecherías por gravedad con una presión constante aproximada de 150 PSI (E. Caballero, Comunicación personal, Diciembre 2024). Este recurso es utilizado principalmente para el uso diario de la lechería, incluyendo la limpieza, el consumo animal y otras actividades operativas esenciales. No obstante, solo Gavilán, Guabal y Principal emplean también este recurso para actividades de riego. Este riego se realiza durante la estación seca entre diciembre y abril, mediante el uso de aspersores con un radio de cobertura de 90 m. Esto les permite disponer de pastos en épocas secas.

Cuadro 3

Fuente de abastecimiento y uso del agua en las fincas de la zona de estudio.

Finca	Fuente hídrica	Uso del agua
Gavilán	Quebrada Elliot	Lechería y riego
Guabal	Quebrada Elliot	Lechería y riego
Principal	Río Colga	Lechería y riego
Márquez	Río Kisinga	Lechería
Colga	Río Colga	Lechería
PRD1	Río David y Río Majagua	Lechería
PRD2	Río David y Río Majagua	Lechería
Rovira	Río David	Lechería

Vegetación

Las especies se puede dividir en dos grupos grandes, las plantadas y las autóctonas. Fincas con mayor presencia de especies plantadas: PRD1, PRD2, Principal y Márquez. Y las fincas con mayor proporción de especies autóctonas: Colga, Guabal, Rovira y Gavilán.

Las especies arbóreas más comunes en las fincas según el gerente de lechería incluyen eucalipto (*Eucalyptus spp.*), macano (*Diphysa americana*), pino (*Pinus spp.*), roble (*Quercus spp.*), higo (*Ficus spp.*), nance (*Byrsonima crassifolia*), aguacatillo (*Persea caerulea*) y limón agrio (*Citrus aurantiifolia*) (E. Caballero, Comunicación personal, Diciembre 2024). Estas especies cumplen funciones claves aparte del ecosistémico, como sombra para el ganado, regulación térmica y retención de suelo. Incluir esta diversidad de especies arbóreas en los potreros permite a los productores múltiples beneficios aprovechables tales como madera, frutos, forraje y sombra, contribuyendo además a mejorar la productividad de la finca y reducir la vulnerabilidad frente a las condiciones climáticas adversas (Esquivel et al., 2011).

En algunas fincas como la de Colga, la cobertura vegetal está compuesta casi totalmente por especies nativas como el mamecillo (*Melicoccus bijugatus*), cenizo (*Plumeria alba*), arraiján blanco (*Symphonia globulifera*) y guayabo (*Psidium guajava*) como mencionó el gerente de lechería (E. Caballero, Comunicación personal, Diciembre 2024). Se identificó el enfoque conservacionista en la integración del sistema agropecuario con el sistema natural. Este enfoque, que prioriza el uso de

especies nativas, no solo conserva la biodiversidad local, sino que también proporciona múltiples beneficios ecosistémicos, como la mejora de la fertilidad del suelo, la regulación hídrica y la provisión de hábitats para la fauna silvestre (Esquivel et al., 2011). Este enfoque se evidencia en la Figura 7, donde se observa la integración de especies arbóreas nativas dentro de las áreas de pastoreo contribuyendo así a la conservación de la biodiversidad y al bienestar animal.

Figura 7

Presencia de especies arbóreas nativas en las áreas de pastoreo de las fincas



Sistema conservacionista

Beneficios ecosistémicos

Cobertura de Suelo

Con base en la nomenclatura del “CORINE Land Cover” por su siglas en inglés (CLC2018), se identificaron cinco coberturas principales dentro de las fincas (Cuadro 4): pastizales permanentes (231), bosques de hoja ancha (311), bosques mixtos (313), vegetación riparia arbolada (311) y áreas de transición entre pastos y bosque (324) (Kosztra et al., 2019). Estas coberturas corresponden a las condiciones actuales de uso del suelo en las fincas donde se observó zonas de aprovechamiento productivo, conservación de recursos hídricos y presencia de cobertura forestal.

Cuadro 4

Coberturas del suelo identificadas según nomenclatura CLC2018.

Tipo de cobertura observada	Clase CORINE	Descripción según CLC2018
Pastizales manejados para pastoreo o corte de forraje	231 – “Pastures”	Terrenos usados permanentemente (≥ 5 años) para producción de forraje. Incluye praderas mejoradas, pastos naturales y áreas de siega bajo manejo agrícola.
Bosques con árboles de hoja ancha	311 – “Broad-leaved forest”	Formaciones dominadas por especies latifoliadas, con cobertura arbórea superior al 30%. Incluye bosques ribereños y parches nativos en zonas planas o colinares.
Bosques mixtos (coníferas y latifoliadas)	313 – “Mixed forest”	Áreas donde ninguna de las especies arbóreas (coníferas o latifoliadas) domina más del 75%. Indica diversidad estructural en parches forestales.
Corredores ribereños arbolados	311 – “Broad-leaved forest”	Bandas de vegetación leñosa adyacentes a ríos o quebradas, asociadas a funciones de protección hídrica y conectividad ecológica.
Áreas de transición entre pastizales y bosque	324 – “Transitional woodland/shrub”	Zonas con vegetación arbustiva, herbácea y árboles dispersos. Representan estados intermedios entre sistemas abiertos y forestales, o bien procesos de regeneración natural.

Análisis De La Influencia Climática Sobre El Rendimiento Lechero***Series de Datos Climáticos***

Los cuadros 5 y 6 muestran los estadísticos descriptivos de las variables climáticas obtenidas de la estación Boquete-108053 y de reanálisis, respectivamente, para el periodo 2015–2024. En ambos casos se observan patrones similares. Las temperaturas mínimas fueron más bajas en el reanálisis, mientras que las máximas fueron similares en ambas fuentes. La precipitación fue considerablemente mayor y más variable en los datos de estación. También se registraron mayores velocidades de viento en los datos de estación. El reanálisis incluyó la variable de radiación, no disponible en la estación. Estas diferencias reflejan el contraste entre datos observados localmente y estimaciones modeladas, lo cual es importante considerar en los análisis posteriores.

Cuadro 5

Estadísticos descriptivos de las variables climáticas registradas por la estación meteorológica

Boquete-108053 (2015–2024).

Variabes	Mediana	Media	Desviación Típica	Mínimo	Máximo
Temp. Mín. (°C)	23.20	21.87	2.09	18.40	24.21
Temp. Máx. (°C)	26.30	26.20	0.77	23.85	28.75
Temp. Prom. (°C)	24.35	23.66	1.40	20.72	25.55
HR (%)	77.21	75.42	10.62	57.76	89.79
Precipitación (mm)	349.00	407.40	351.88	0.00	1296.00
Viento (m/s)	3.58	3.69	1.94	1.51	8.44

Cuadro 6

Estadísticos descriptivos de las variables climáticas obtenidas por reanálisis (2015–2024).

Variable	Mediana	Media	Desviación Típica	Mínimo	Máximo
Temp. Min. (.C)	16.95	16.85	0.88	14.30	18.60
Temp. Max. (.C)	26.40	26.55	1.06	24.20	30.20
Precipitación (mm)	230.00	236.44	166.18	6.00	891.00
Viento (m/s)	2.18	2.33	0.64	1.40	4.41
Radiación	210.50	211.81	28.14	124.60	272.90

Los resultados de las pruebas de normalidad indicaron que las variables analizadas no siguen una distribución normal. Este comportamiento es común en series climáticas, ya que suelen estar influenciados por múltiples factores no lineales. Esta característica ha sido ampliamente documentada, destacando la naturaleza colectiva y no lineal del sistema climático global (Vannitsem et al., 2025).

Datos Observados.

Las Figuras 8 y 9 presentan variables registradas por la estación meteorológica Boquete-108053 durante los periodos en lo que se dispone desde 2015 al 2024. Los tramos sin línea representan periodos con dato faltantes, principalmente entre 2018 hasta finales del 2020, también detallado en el Anexo D.

Temperaturas Mínimas, Promedio y Máximas. Presentaron un comportamiento similar entre el 2015 al 2017, con una tendencia general a la disminución hacia finales de 2017, probablemente

influenciada por el evento La Niña. Sin embargo, después del vacío de información se observa un cambio brusco en las temperaturas principalmente en la mínima, esto puede deberse a un posible error o recalibración en la estación meteorológica a partir de ese año, lo cual limita la interpretación precisa de estos datos.

Precipitación. Los mayores acumulados se observaron durante el 2016 y nuevamente desde 2021 al 2023. Esto coincide con el evento de la niña que hubo entre 2016-2017. De igual forma las lluvias intensas que se observan en el 2021 y el 2022 están asociadas a la influencia de La Niña llegando a picos acumulados de 1,200 mm.

Figura 8

Temperatura Mínima °C, Promedio °C y Máxima °C de Datos Observados (2015-2024).

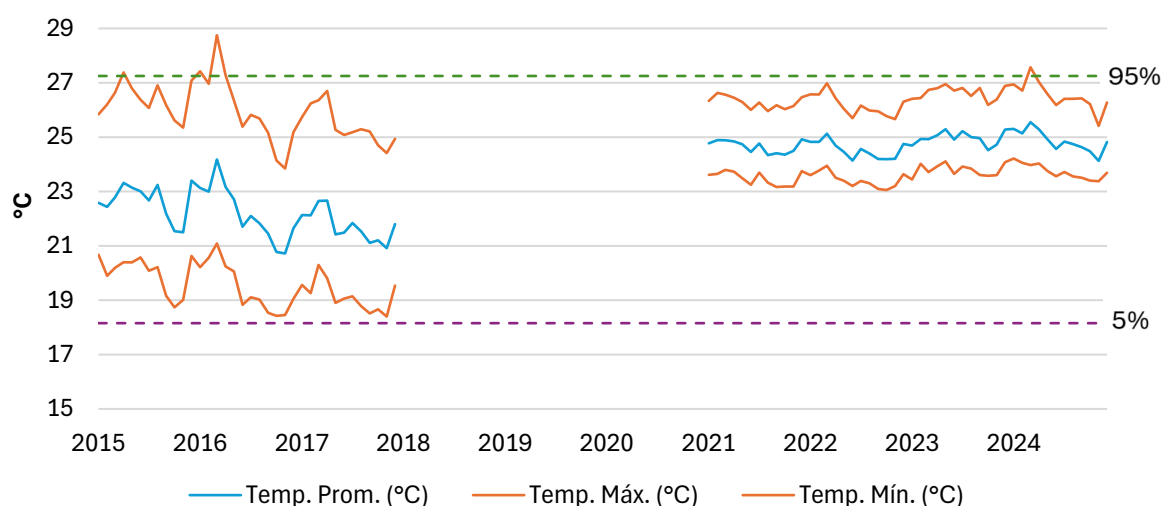
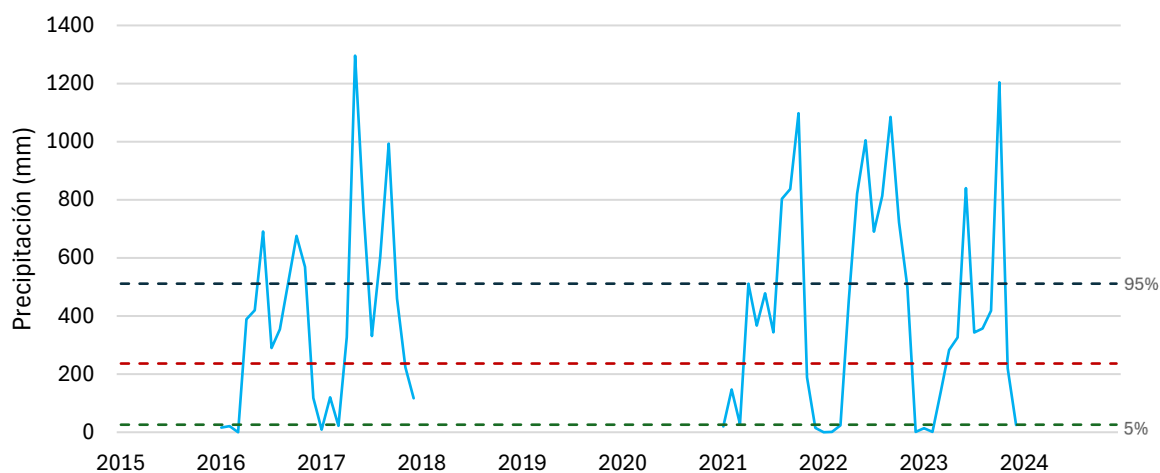


Figura 9

Precipitación de Datos Observados (2015-2024).



Datos de Reanálisis.

Temperatura Mínima y Máxima. Las Figuras 10 y 11 presentan la evolución de las temperaturas mínimas y máximas registradas en las fincas PGG, COLGA y PRD durante el periodo 2015–2024. En ambas variables se observa una marcada estacionalidad. Se identificaron eventos de calor que alcanzan o superan el percentil de 95%, lo cual representa condiciones potenciales a ser críticas en la eficiencia productiva del ganado lechero, dado el impacto negativo del estrés térmico sobre la ingesta, la fertilidad y la producción de leche (Bernabucci et al., 2014).

Por otro lado, las temperaturas mínimas registradas muestran mayor variabilidad en la finca COLGA, con eventos por debajo del percentil 5%. Esta finca, al ubicarse en una zona de mayor altitud y con topografía montañosa, presenta condiciones micro climáticas propensas a descensos térmicos más acentuados. A pesar de que las bajas temperaturas pueden representar un riesgo en términos de estrés por frío, las vacas en lactancia avanzadas razas Holstein pueden favorecerse de bajas temperaturas, al reducir el impacto del estrés por calor y mejorar el rendimiento productivo en ambientes frescos (West, 2003).

Al comparar las series (PGG, COLGA y PRD) siguen una tendencia térmica similar, aunque con diferencias notables en la magnitud y variabilidad de los valores. Siendo COLGA la de mayor diferencia.

Figura 10

Temperatura Mínima °C de Datos de Reanálisis (2015-2024).

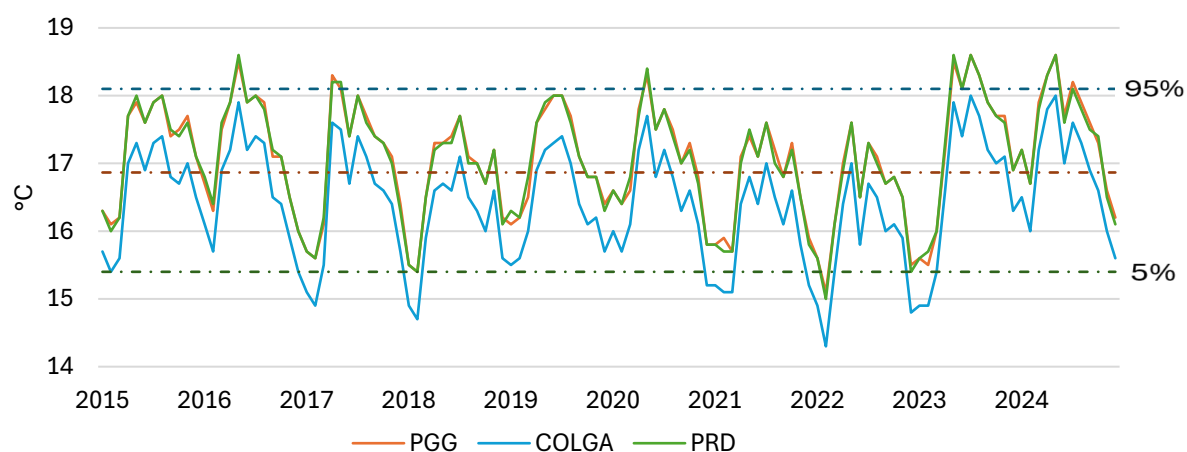
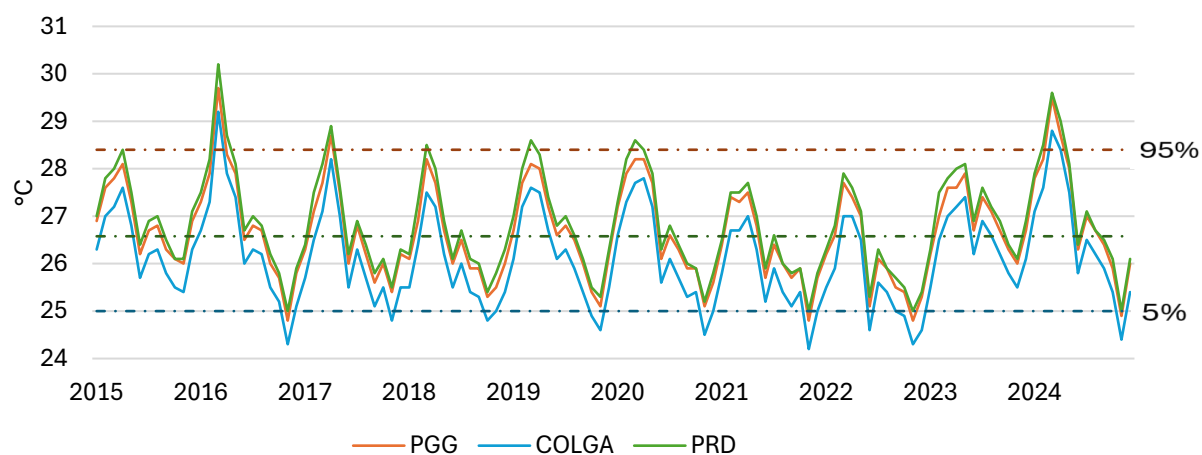


Figura 11

Temperatura Máxima °C de Datos de Reanálisis (2015-2024).

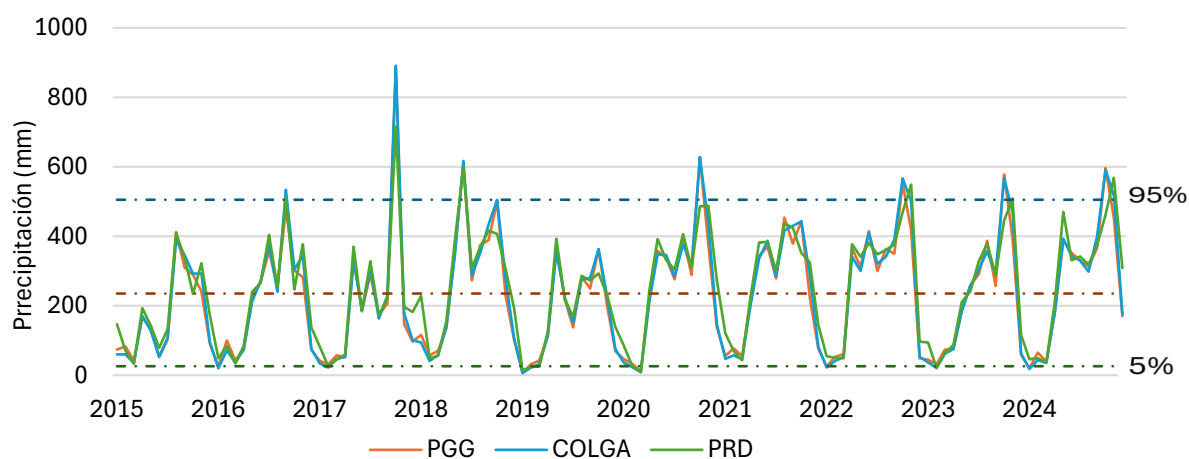


Precipitación. La Figura 12 muestra la evolución de la precipitación entre 2015 y 2024 en las fincas PGG, COLGA y PRD. Se observa una alta variabilidad interanual, con eventos extremos en años como 2017 que puede ser explicado por el evento de La Niña junto al Huracán Nate. En los últimos años, la precipitación ha tendido a mantenerse por encima del percentil 95%. La estación seca se mantiene estable a inicios y final de año.

Sin embargo, las lluvias intensas generan exceso de humedad y barro, aumentando el riesgo de enfermedades podales, como lo reportan los trabajadores de las fincas. Además, la combinación de lluvias con bajas temperaturas mínimas reduce el confort animal, lo cual puede afectar negativamente la producción de leche (West, 2003).

Figura 12

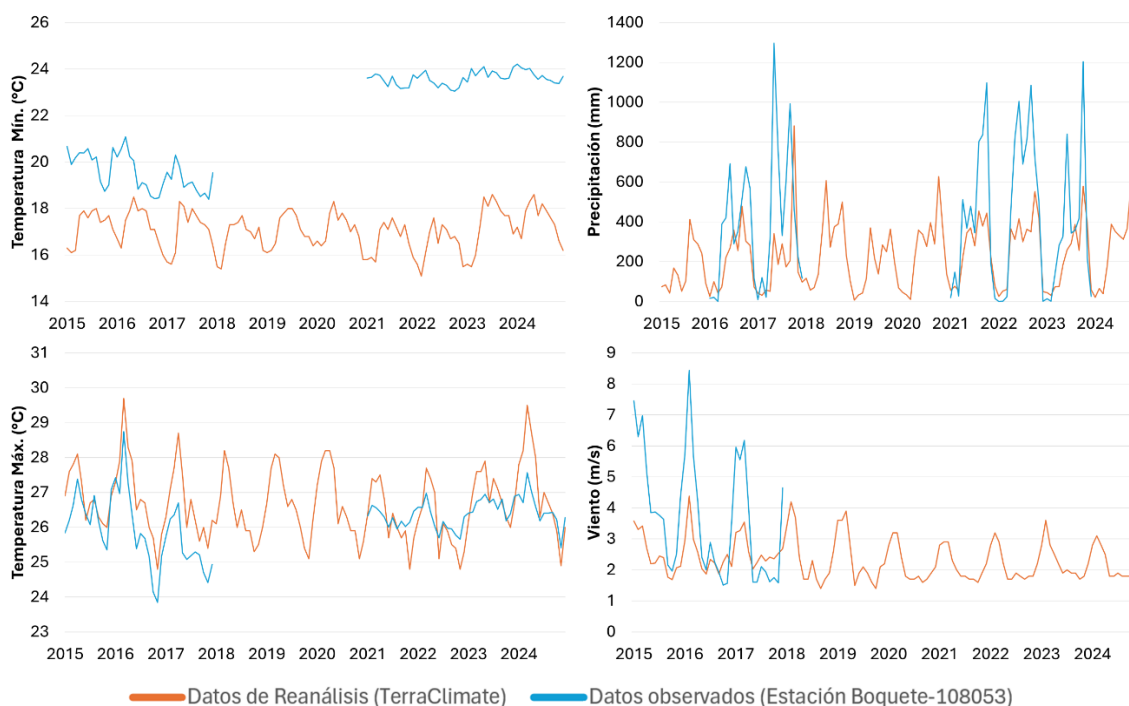
Precipitación (mm) de Datos de Reanálisis (2015-2024).



Comparativa. Los datos de reanálisis (“TerraClimate”) y los observados (Boquete-108053) muestran diferencias notables (Figura 13 y 14). Los datos obtenidos de reanálisis tienden a subestimar las precipitación y velocidad del viento en comparación con los datos observados. En el caso de las temperaturas se observa una clara diferencia por una causa desconocida, principalmente la temperatura mínima. Las diferencias en general pueden atribuirse a las limitaciones del producto “TerraClimate”, como también puede ser la afectación por nubosidad densa y el relieve montañoso que puede dificultar la precisión de las mediciones en zonas como en Boquete. Sin embargo, los datos de reanálisis ofrecen la ventaja de fácil accesibilidad y con series completas, a diferencia de las observadas que puedes presentar vacíos de información.

Figura 13

Comparación de datos observados con datos de reanálisis de las fincas PGG.



Serie de Producción de Leche

El Cuadro 7 presenta los estadísticos descriptivos de la producción de leche en las fincas analizadas entre 2015 y 2024, evidenciando una variabilidad considerable en los valores registrados. Esta diferencia entre fincas se refleja también en la Figura 14, donde se observa la evolución mensual promedio de la producción por vaca, destacando tanto fluctuaciones estacionales como contrastes en el rendimiento general. La finca PRD presentó los valores promedio más altos, mientras que COLGA mostró una mayor variabilidad interanual, posiblemente asociada a diferencias en el manejo o a condiciones geográficas particulares.

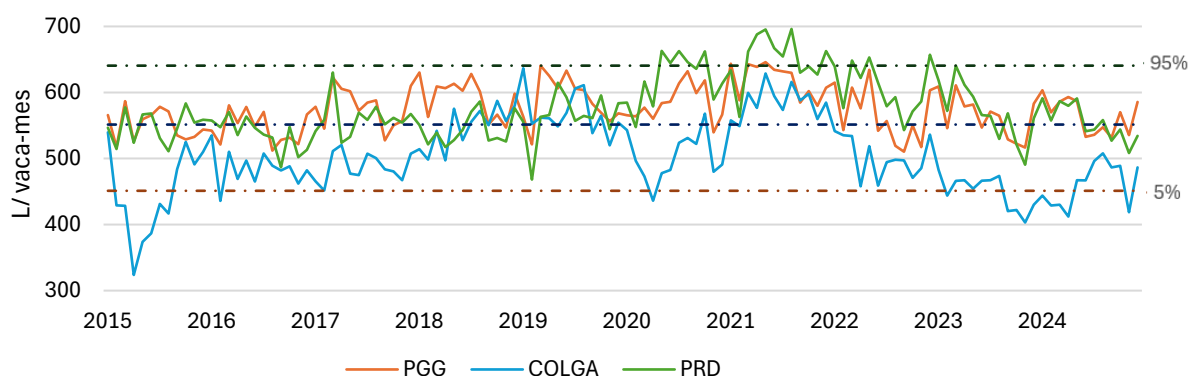
Cuadro 7

Estadísticos descriptivos de las variables de producción lechera (2015–2024).

Finca	Mediana	Media	Desviación Típica	Mínimo	Máximo
PGG	574.23	575.44	35.47	510.33	645.95
CM	497.08	503.37	57.37	323.74	636.60
PRD	565.86	575.68	47.71	468.16	696.20

Figura 14

Producción mensual promedio de leche por vaca en las fincas de la Hacienda La Esmeralda (2015-2024)



Correlación entre Clima y Producción de leche

En las Figuras 15, 16 y 17 se presentan mapas de calor que muestran los coeficientes de correlación entre las variables climáticas y la producción mensual de leche. La intensidad del color refleja la magnitud del valor de correlación, mientras que la tonalidad (de rojo a verde) indica su dirección, siendo los tonos rojos asociaciones negativas y los verdes, positivas.

Correlación con Datos Observados

El análisis de las correlaciones a partir de los datos observados, interpretado según la tabla de Belizario-Quispe (2015), presentó un 42.85% de correlaciones en rangos de moderadas a altas. Aunque la mayoría de estas fueron positivas, se identificó que un 30% de estas correlaciones son negativas (Figura 15).

Se evidencia que en los coeficientes de correlación entre las variables climáticas y la producción de leche se detallan en el Cuadro 3, que la precipitación presenta una mayor frecuencia de correlaciones negativas en relación con la producción de leche, especialmente en el año 2022 y el 2023, indicando el efecto negativo que conlleva excesos de lluvia en temas productivos, y esto es más

notable en la finca de COLGA. La temperatura mínima presenta correlaciones en su mayoría positivas en el grupo de fincas PGG sugiriendo buen confort térmico, sin embargo, en COLGA se observan efectos negativos en años como el 2024, posiblemente por temperaturas cálidas que afectaron el confort del ganado. La temperatura máxima muestra tendencias positivas en PGG indicando su menor sensibilidad al estrés calórico, sin embargo, COLGA muestra correlaciones negativas reflejan mayor sensibilidad al calor. Desde el punto de vista con datos observados, la finca PGG es más resistente a diferencia de COLGA frente a las variables climáticas.

Figura 15

Mapa de Calor: Coeficientes de correlación entre variables climáticas y producción de leche

utilizando datos observados (2015-2024).

Finca	Variable	2015	2016	2017	2021	2022	2023	2024
PGG	Temp. Mín.	50%	43%	72%	47%	52%	22%	72%
COLGA		-40%	17%	47%	-22%	70%	8%	-51%
PGG	Temp. Máx.	14%	45%	37%	7%	57%	42%	64%
COLGA		-64%	33%	27%	-41%	65%	23%	26%
PGG	Temp. Prom.	39%	50%	61%	30%	62%	39%	72%
COLGA		-58%	29%	44%	-34%	70%	23%	-36%
PGG	Precipitación	S/D	-28%	-20%	-19%	-50%	-54%	S/D
COLGA		S/D	-29%	-10%	44%	-69%	-19%	S/D
PGG	HR	-28%	-26%	-40%	-16%	-39%	-47%	S/D
COLGA		26%	-15%	-11%	48%	-71%	-8%	S/D
PGG	Viento	29%	8%	38%	S/D	S/D	S/D	S/D
COLGA		-11%	-8%	6%	S/D	S/D	S/D	S/D

Nota: S/D=sin datos.

Correlación con Datos de Reanálisis

El análisis de los coeficientes de correlación según la tabla de Belisario Quispe entre variables climáticas y producción lechera (Figura 16) muestra una influencia variable a lo largo del periodo 2015–2024, con valores que oscilan entre relaciones altamente positivas (> 80%) y negativas extremas (< -80%). Del total, el 42.67% de las correlaciones se ubicaron en el rango de moderadas a muy altas; de estas, el 35.94% correspondieron a correlaciones negativas.

La temperatura mínima destaca correlaciones positivas en años como 2019 y 2020 (PGG: +64.6%, PRD: +49.7% y +57.5%), lo que sugiere que temperaturas nocturnas moderadas estuvieron asociadas a un mayor rendimiento lechero. Por otro lado, en 2023 se observan correlaciones negativas (PGG: -39.7%, PRD: -46.8%), coincidiendo con un año cálido asociado al fenómeno El Niño al final del año, debido a que altas temperaturas diurnas y nocturnas dificultan la liberación de calor interno del ganado. Estos resultados respaldan que variaciones térmicas nocturnas pueden influir en el confort y desempeño animal (West, 2003).

La temperatura máxima mostró relaciones positivas marcadas en PGG y PRD especialmente entre 2016 y 2017 (+69.7% y +61.9%, respectivamente) y 2024 (+61.9% y +69.1%), mientras que en COLGA predominaron valores negativos en la mayoría de los años. En zona cálidas el aumento de la máxima podría ser más tolerable si no se supera el umbral fisiológico de confort, sin embargo, normalmente en zonas frías y de altitud como COLGA, el mismo incremento de la temperatura máxima puede inducir estrés térmico (Bernabucci et al., 2014), también interviene otros factores como acceso a sombra y agua.

La precipitación evidencia correlaciones altamente negativas en las tres fincas durante 2022 (PGG: -53.9%, COLGA: -85.8%, PRD: -48.8%) y 2023 (PGG: -69.0%, COLGA: -49.8%, PRD: -84.3%) indicando un impacto adverso de lluvias intensas y frecuentes sobre la producción, probablemente por saturación del terreno, dificultades de acceso y mayores riesgos sanitarios (Cook, 2017). Por otro lado, años como el 2019 y 2020 presentaron correlaciones positivas en las tres fincas, sugiriendo que las lluvias moderadas favorecieron la disponibilidad de pasturas y contribuir al confort térmico.

La radiación solar se asoció positivamente con la producción en los últimos 3 años, especialmente en PRD (2023: +82.9%; 2024: +85.7%) y PGG (2024: +57.5%), esto por el posible efecto en el crecimiento de pasturas y el secado de suelos tras eventos de lluvia. Sin embargo, en año como el 2015 con influencias de El Niño, presenta correlaciones negativas lo que podría indicar un exceso de radiación en combinación con baja humedad edáfica.

El viento presentó correlaciones variables. En COLGA se observaron valores positivos altos en 2022 (+66.8%), pero negativos marcados en 2024 (-68.0%), al igual que en el 2020 en PRD (-73.0%). El efecto del viento depende del contexto micro climático, pudiendo favorecer la ventilación o en combinación con frío y humedad, agravar el estrés térmico (Collier et al., 2006).

A pesar de las correlaciones observadas y de ciertas coincidencias temporales con eventos climáticos como El Niño y La Niña, los resultados no evidencian un patrón ni una tendencia general sostenida a lo largo del periodo analizado. De forma similar, García et al. (2009) encontraron que, aunque hubo diferencias en los rendimientos lecheros durante algunos años con presencia del El Niño estas no fueron consistentes ni suficientes para establecer una relación directa entre el fenómeno y la producción de leche.

Figura 16

Mapa de calor: Coeficientes de correlación entre variables climáticas y producción de leche utilizando datos de reanálisis (2015-2024).

Finca	Variable	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
PGG		2.5%	36.1%	9.5%	7.9%	64.6%	43.2%	16.8%	-10.5%	-39.7%	0.2%
COLGA	Temp.Mín.	-36.6%	27.5%	44.4%	37.6%	7.4%	-12.5%	50.7%	-57.8%	-13.7%	10.8%
PRD		-5.9%	41.2%	-37.3%	2.9%	49.7%	57.5%	51.0%	-15.7%	-46.8%	56.8%
PGG		-25.1%	-30.7%	-30.0%	-14.6%	16.8%	52.2%	-5.6%	-53.9%	-69.0%	-56.6%
COLGA	Precipitación	16.7%	-12.2%	-7.9%	41.9%	-27.4%	34.2%	52.7%	-85.8%	-49.8%	39.4%
PRD		-29.5%	-67.1%	-14.9%	11.7%	61.7%	59.1%	41.2%	-48.8%	-84.3%	-60.5%
PGG		4.6%	50.5%	61.9%	40.6%	39.7%	-16.0%	49.1%	57.1%	50.1%	61.9%
COLGA	Temp.Máx.	-61.2%	21.8%	46.0%	-52.6%	15.6%	-42.4%	3.1%	19.6%	44.2%	-43.0%
PRD		-34.4%	69.7%	-0.8%	-24.5%	-25.3%	-33.4%	2.1%	39.7%	57.9%	85.7%
PGG		29.1%	-19.5%	16.5%	19.9%	-10.2%	-49.6%	21.5%	35.5%	45.6%	59.1%
COLGA	Viento	-10.2%	-27.7%	-5.3%	-58.2%	23.0%	-26.4%	-39.3%	66.8%	33.6%	-68.0%
PRD		-27.4%	32.9%	46.6%	-9.7%	-57.7%	-73.0%	-39.5%	23.0%	56.3%	47.2%
PGG		6.2%	26.7%	31.8%	-4.4%	24.5%	-3.6%	41.4%	44.3%	51.6%	57.5%
COLGA	Radiación	-47.9%	2.4%	4.7%	-18.4%	30.9%	-44.1%	4.7%	63.2%	49.6%	-26.1%
PRD		8.4%	53.4%	32.3%	-21.1%	-45.9%	-20.0%	0.6%	23.2%	82.9%	85.7%

Comparativa entre Observados y Reanálisis

A modo de validación, se realizó una comparación entre los resultados de correlación de la producción de leche con los datos climáticos obtenidos de datos observados y de reanálisis (Figura

17). Con esto se buscó identificar similitud y diferencias que aporta información sobre los dos tipos de datos para evaluar el impacto climático en las fincas. La comparación entre ambas fuentes de datos revela porcentajes similares de correlaciones moderadas a muy altas (42.67% en reanálisis y 42.85% en observadas). Siendo también similares el nivel de correlaciones negativas dentro del porcentaje de las correlaciones por encima de las moderadas (35.94% en reanálisis y 30% en observadas).

En las Fincas PGG se observan tendencias consistentes entre ambos tipos de datos. Lo que sugiere que en esta finca la producción de leche responde de mejor manera ante cambios en la temperatura y que tanto los observados como los de reanálisis son útiles para realizar monitoreo. En la zona de COLGA, las correlaciones son más variables y presentan más discrepancias entre los observados y de reanálisis. Esto podría explicarse debido a la distancia de la finca con respecto a la estación de Boquete (4.7 km) y sus condiciones topográficas, ya que esta se encuentra en una zona más elevada y entre dos pronunciadas colinas que puede generar microclimas que no pueda captar la estación. A diferencia de PGG, donde las tres fincas están ubicadas a menos de 4 km de la estación y en condiciones topográficas más parecidas.

Por otra parte, la finca PRD no fue incluida en la comparación debido a que se encuentra lejano a la estación, una distancia suficiente para que existan diferencias climáticas notables lo cual haría a los datos observados perder representatividad en la finca.

Figura 17

Mapa de Calor: Comparación de los coeficientes de correlación entre datos observados y datos de reanálisis para variables climáticas y producción de leche. (2015-2024).

		Datos Observados						
Finca	Variable	2015	2016	2017	2021	2022	2023	2024
PGG	Temp.Mín.	49.5%	43.1%	72.3%	47.2%	52.4%	22.4%	72.3%
COLGA		-39.9%	17.4%	47.3%	-21.6%	70.4%	8.3%	-51.4%
PGG	Precipitación	S/D	-28.3%	-20.0%	-18.5%	-49.7%	-53.9%	S/D
COLGA		S/D	-29.0%	-10.2%	44.3%	-68.9%	-19.1%	S/D
PGG	Temp.Máx.	14.0%	45.4%	36.9%	6.9%	57.0%	42.2%	64.2%
COLGA		-64.2%	32.6%	26.7%	-40.6%	65.2%	22.6%	26.4%
		Datos de Reanálisis						
PGG	Temp.Mín.	2.5%	36.1%	9.5%	16.8%	-10.5%	-39.7%	0.2%
COLGA		-36.6%	27.5%	44.4%	50.7%	-57.8%	-13.7%	10.8%
PGG	Precipitación	-25.1%	-30.7%	-30.0%	-5.6%	-53.9%	-69.0%	-56.6%
COLGA		16.7%	-12.2%	-7.9%	52.7%	-85.8%	-49.8%	39.4%
PGG	Temp.Máx.	4.6%	50.5%	61.9%	49.1%	57.1%	50.1%	61.9%
COLGA		-61.2%	21.8%	46.0%	3.1%	19.6%	44.2%	-43.0%

El análisis permitió explorar la relación climática y productiva en las fincas lecheras durante el periodo 2015–2024. Si bien se identificaron fluctuaciones notables en variables como la precipitación, el viento y la temperatura máxima, y que estas estas responden mejor a condiciones de eventos climáticos extremos como el Niño o la Niña, aún no se puede establecer de forma concluyente qué variables climáticas inciden directamente al rendimiento lechero. Sin embargo, estas observaciones preliminares permiten orientar el análisis hacia la búsqueda de relaciones más específicas, que serán abordadas en el siguiente apartado, con el fin de identificar las variables climáticas con mayor influencia en las fluctuaciones de la producción de leche.

Simulación del impacto climático proyectado en la producción lechera bajo escenarios futuros

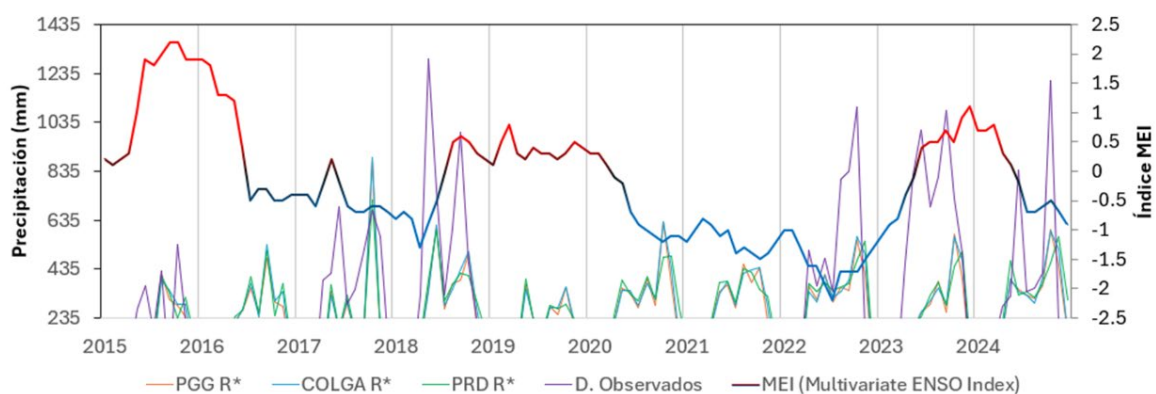
Escenarios Climáticos

Con base en la Figura 18 se definieron los años 2015 como análogo de un evento El Niño y el 2022 como análogo de un evento La Niña para la realización de las proyecciones climáticas bajo el escenario CMIP6 SSP5 8.5. Esto se fundamentó en el comportamiento del “Multivariate ENSO Index”

MEI, por sus siglas en inglés) que refleja el comportamiento de estos eventos climáticos y en los patrones de precipitación registrada.

Figura 18

Comparación entre el Índice Multivariado ENSO (MEI) y la precipitación de datos observados y de reanálisis.



Nota. (R): proviene de datos de reanálisis.

Los resultados obtenidos de comparar los datos de años análogos del 2015 (El Niño) y el 2022 (La Niña) con las proyecciones futuras de temperatura del modelo CMIP6 8.5 del IPCC (Figura 19) revelan patrones contrastantes y relevantes para la sostenibilidad de la ganadería en regiones tropicales como la finca evaluada en Panamá. En estos años similares a las condiciones climáticas como la de El Niño como fue el caso del 2015, la producción mostró descensos pronunciados particularmente en meses con temperaturas máximas elevadas. Proyectando estas condiciones hacia escenarios futuros con mayor temperatura (2040, 2060 y 2080) la pérdida estimada de producción se incrementa radicalmente lo que concuerda con lo reportado por West (2003), quien señaló que el estrés térmico puede reducir el rendimiento lechero hasta un 30% bajo condiciones crítica de estrés por calor.

Por otro lado, en el año 2022 que representa un evento La Niña mostro un comportamiento diferente. Las correlaciones indicaron correlaciones negativas tanto a la precipitación como la temperatura mínima en las tres fincas evaluadas. Resaltando que la precipitación mostró

correlaciones extremadamente altas, lo cual podría estar asociado a encharcamiento de los potreros, menor disponibilidad y calidad de los pastos y al aumento de incidencia a enfermedades relacionado a humedad. La temperatura mínima también presentó correlaciones negativas indicando las madrugadas cálidas y humedad podrían comprometer el confort térmico y la eficiencia energética del ganado, generando un ambiente metabólicamente desfavorable para la producción.

Sin embargo, al proyectar estas condiciones hacia escenarios futuros bajo modelos de cambio climático, se estima que el aumento de la temperatura máxima incluso en contextos lluviosos como en el evento La Niña podría amortiguar levemente los efectos adversos del exceso de precipitación. Este fenómeno se podría explicar con mayores tasas de evapotranspiración y las existencias de pequeñas ventanas de calor con radiación solar en eventos lluviosos lo que estimularía el crecimiento de los pastos y mejorar momentáneamente el confort térmico en el ganado. Sin embargo, si cesa las lluvias y las temperaturas elevadas se mantienen de forma sostenida, el ganado empezará a entrar en un estado de estrés térmico similar al observado en el modelo durante años Niño como en el 2015, especialmente si no se cuenta con medidas adecuadas para manejar el estrés calórico.

Este tipo de interacción ha sido reportado por (Bouraoui et al., 2002), quienes encontraron que el Índice Temperatura-Humedad (ITH) tiene una fuerte correlación inversa con la producción de leche en vacas lecheras, incluso en climas que no son extremos. También, West (2003) señala que el estrés calórico prolongado puede reducir el consumo de alimento, alterando el metabolismo energético y comprometiendo la función reproductiva, con efectos directos sobre la productividad. Además, Rojas-Downing et al. (2017) destacan que en zonas tropicales, los impactos del cambio climático sobre los sistemas ganaderos son altamente dependientes de la interacción entre precipitación, temperatura y el manejo del sistema, por lo que se necesita un enfoque integral para anticipar y mitigar estos efectos en las fincas. Nardone et al. (2010) advierten que los sistemas ganaderos ubicados en regiones tropicales serán los más vulnerables al cambio climático, debido a la

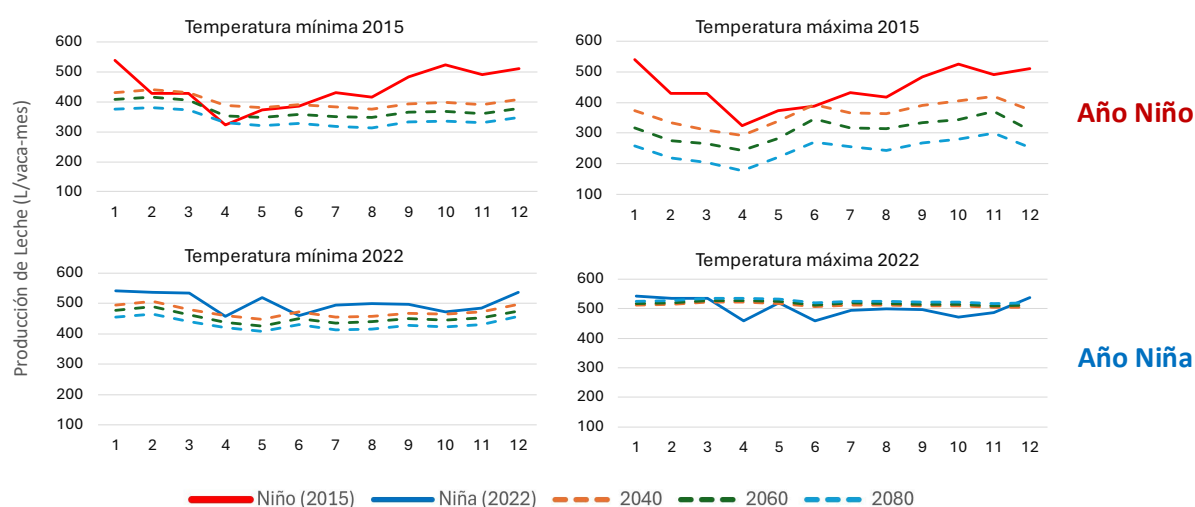
ya elevada carga térmica, limitada infraestructura adaptativa y alta sensibilidad del ganado a los episodios prolongados de estrés calórico.

Aunque próximos años tipo La Niña podrían ser menos perjudiciales frente el cambio climático según el escenario que solo toma en cuenta la temperatura, los resultados indican que las lluvias pueden representar un riesgo a considerar para la producción lechera en zona tropicales y frías como Boquete, Panamá. Es cierto que la temperatura máxima proyectada para el 2080 podría aliviar los efectos de la lluvia, esto no garantiza un ambiente óptimo para la productividad si no se acompaña con estrategias de manejo adaptativo.

Debido a la incertidumbre en la modelación de la precipitación, las simulaciones futuras consideraron únicamente variables térmicas. No obstante, se reconoce que la precipitación presentó correlaciones negativas marcadas en eventos pasados. Esta limitación restringe una estimación completa del impacto climático.

Figura 19

Estimaciones de la producción de leche bajo diferentes escenarios de cambio climático en función de las variables temperatura mínima y máxima en dos años análogos contrastantes 2015 (Niño) y 2022 (Niña).



Además de las variables climáticas, existen diversos factores que no se toman en cuenta en el modelo empírico, que influyen en la producción lechera. Entre estos se encuentran aspectos como la raza del ganado, el manejo nutricional, la incidencia de enfermedades, el tipo de forraje, la frecuencia de ordeño, el estrés social y el sistema de manejo productivo. El Cuadro 5 resume estos factores junto con su efecto sobre el rendimiento lechero, la magnitud del impacto reportado en la literatura científica.

Cuadro 8

Factores no climáticos influyentes en la producción lechera.

Factor	Efecto sobre la producción lechera	Magnitud del impacto	Referencias
Raza	Determina el potencial lechero. Holstein rinde más que Jersey.	Holstein produce ~23% más leche por lactación que Jersey.	Coffey et al., 2016; González Blanco y WingChing-Jones, 2018
Alimentación	Dietas adecuadas maximizan la producción; restricciones reducen significativamente el rendimiento.	Reducciones de ~21% al limitar ingesta al 60%.	Abdelatty et al., 2017; Herve et al.
Enfermedades	Mastitis y cojeras reducen la producción por afectación del bienestar y funcionalidad.	Mastitis ~24.5% menos; cojeras ~28–40% menos producción.	Martins et al., 2020; Džermeikaitė et al., 2025
Tipo de forraje	Forrajes más digestibles permiten mayor ingesta y rendimiento.	Alfalfa vs. pasto: +6%; maíz BMR vs. convencional: +1.5 kg/vaca/día.	Ferreira y Teets, 2020; Ferraretto y Shaver, 2015
Ordeño	Buen manejo y más ordeños diarios elevan la producción sostenida.	Ordeño 3x/día: +2.23 kg/vaca/día.	Sanchez-Duarte et al., 2020
Estrés social	Cambios sociales como la remoción o traslado de animales generan estrés y reducen la producción lechera.	Remoción de vacas: –0.9 a –1.0 kg/vaca/día Traslado de sistema: –23.3% leche el primer día.	Broucek et al., 2017; Valníčková et al., 2024
Sistema de manejo	Sistemas intensivos (TMR) permiten mayor producción diaria que sistemas extensivos (pastoreo).	Pastoreo: –9.3% en leche vs. confinamiento	Brito et al., 2022

Recomendaciones de Manejo

Las recomendaciones presentadas a continuación se derivan de un proceso de diagnóstico participativo que combinó revisión de literatura, observación directa en campo, entrevistas con actores clave y análisis de correlación. Si bien el estrés por calor fue el factor climático más citado en la literatura como limitante para la producción lechera, las recomendaciones fueron ajustadas a las condiciones específicas de las fincas evaluadas.

Fortalecer el Manejo de la Salud Podal

La alta incidencia de enfermedades podales observadas en la visita a las fincas durante la época lluviosa podría estar relacionados con los resultados obtenidos de los análisis de datos, donde se observaron altas correlaciones negativas entre la precipitación y la producción de leche, sugiriendo que las enfermedades podales durante la época lluviosa podrían ser uno de los factores que explican dicha disminución. Como señala Moreira et al. (2019), los factores ambientales como la humedad, el mal drenaje y los suelos duros o irregulares incrementan el riesgo de lesiones podales, por lo que se recomienda implementar pediluvios regulares como el uso de desinfectantes como sulfato de cobre al 5% preferiblemente en las salidas de la sala de ordeño. Según Cook (2017), el sulfato de cobre es uno de los agentes más eficaces en pediluvios para controlar enfermedades infecciosas del casco, debido a su acción antibacteriana sobre la microbiota que habita en el casco del ganado. Esta medida, combinada con el mantenimiento de corrales y caminos secos, reduciría significativamente la prevalencia de lesiones. Se ha encontrado que la higiene de los animales y el tiempo prolongado que pasan en los corrales están asociados con un mayor riesgo de cojeras y dermatitis digital, siendo también relevantes factores como la frecuencia de limpieza, las condiciones de las salidas del corral y la acumulación de estiércol en las rutas de acceso (Moreira et al., 2019).

Optimizar el Manejo de Pastoreo Rotativo

El sistema actual de las fincas se basa en pastoreo rotativo, la cual podría mejorarse ajustando los tiempos de ocupación y descanso de los potreros por lo que también se debe considerar el tamaño

de las fincas para el área a ocupar por potrero. Para el pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*), se recomienda un período de descanso entre 28 y 35 días, según la altitud, la fertilidad del suelo y las condiciones climáticas. Villalobos y Arce (2013) encontraron que este intervalo permite alcanzar un equilibrio entre la disponibilidad de biomasa y la calidad nutricional del forraje, especialmente bajo condiciones de altitud media como las presentes en algunas de las fincas evaluadas. Sin embargo, en las zonas más frías o de menor tasa de crecimiento, como COLGA, este periodo puede prolongarse hacia los 35 días para asegurar un rebrote adecuado. Y desde el enfoque de sostenibilidad, Rojas-Solano et al. (2022) encontraron que *Cynodon nlemfuensis* presentó los mayores valores de carbono orgánico del suelo (COS), biomasa aérea y radical en comparación con otros pastos evaluados, sugiriendo que su manejo adecuado no solo optimiza la producción forrajera sino que también contribuye significativamente al secuestro de carbono y a la mitigación del cambio climático.

Mejora del Sistema Silvopastoril

La siembra de árboles forrajeros como *Gliricidia sepium*, *Erythrina poeppigiana* o *Moringa oleifera* dentro de los potreros puede ofrecer sombra y suplementación nutricional natural. Si bien las fincas objeto de estudio tienen buena cobertura arbórea, sin embargo, esta podría transicionar a un sistema más completo con la unión de especies forrajeras que tendrían beneficios como los mencionados. Esta estrategia es especialmente útil en zonas más cálidas como en las fincas de PRD, donde las temperaturas medias son más elevadas. En este sentido, Zeppetello et al. (2022) reportaron que la temperatura superficial en sistemas silvopastoriles puede disminuir entre 0.32 y 2.4 °C por cada 10 t de biomasa leñosa por hectárea, lo que evidencia el efecto enfriador de la cobertura arbórea.

De forma complementaria, Pérez-Hernández et al. (2024) observaron que la cobertura de árboles en pasturas redujo significativamente la temperatura de la piel de las vacas durante la estación seca, lo cual indica una mejora en el confort térmico y en la distribución de las actividades diarias del ganado. Además, Jiménez-Ferrer et al. (2015) encontraron que el uso de *Erythrina poeppigiana* en sistemas silvopastoriles mejora la producción de leche en el trópico, proporciona una fuente

significativa de proteína (320 g/kg MS), complementando la baja calidad proteica de los pastos tropicales.

Asimismo, Amad y Zentek (2023) señalan que la inclusión de *Moringa oleifera* en la alimentación de rumiantes contribuye a la mitigación del cambio climático debido a que es un árbol de rápido crecimiento, con raíces profundas y gran capacidad de producción de biomasa, lo que lo convierte en un excelente sumidero de carbono y gracias a sus compuestos bioactivos (como taninos, saponinas y flavonoides), moringa reduce la producción de metano en el rumen. Estas prácticas son relevantes considerando los resultados que indican altas correlaciones negativas entre la temperatura máxima y la radiación con la producción de leche, así como los modelos climáticos que predicen incrementos en la temperatura. Implementar sistemas silvopastoriles con árboles forrajeros podría mitigar los efectos adversos del estrés térmico en el ganado y poder mantener la productividad lechera en condiciones climáticas cambiantes.

Mejora Genética con un Enfoque a la Resiliencia

La mayoría de las fincas tienen la raza Holstein pura y solo una tiene Holstein y Jersey, pero esto representa un riesgo ante las condiciones ambientales observadas. Es de destacar que la raza Holstein tiene un buen potencial productivo, sin embargo, esta raza mostró vulnerabilidad tanto en las épocas lluviosas como en las cálidas. En los análisis de correlación realizados sugieren que las lluvias tienen un alto impacto y es posible sea a causa de problemas podales. Esto se sostiene de las observaciones que se hicieron en campo, donde fue frecuente encontrar animales con cojeras visibles. Por otro lado, durante la época caliente también se identificó correlaciones negativas elevadas entre la producción y la temperatura máxima, indicando que fueron afectadas por el estrés calórico perjudicando el desempeño del hato.

Frente este panorama, el cruce genético presenta como una posible estrategia de adaptación. Según literatura se recomienda el cruzamiento con razas más resistentes como la Jersey, esta raza ha demostrado ser mayor tolerante al calor y menor incidencia de enfermedades podales. Solano-López

et al. (2018) reportaron que las vacas cruzadas Holstein × Jersey presentaron menor incidencia de lesiones podales que las Holstein puras, mientras que, Ruiz-Jaramillo et al. (2019) encontraron que los animales cruzados tienden a mantener una producción más estable frente al estrés térmico. Además, estudios fisiológicos confirman que las Holstein puras presentan respuestas más severas al calor, como mayor temperatura rectal y frecuencia respiratoria (Gonzales, 2021). Bien es cierto que esto conllevaría una decisión compleja y de largo plazo, la evidencia sugiere que podría mejorar la resiliencia de la producción de leche en el contexto de la creciente variabilidad climática.

Monitoreo Agroclimático

De acuerdo con el servicio meteorológico nacional, Boquete posee varias estaciones meteorológicas, sin embargo, pueden no representar el microclima presente en las fincas debido a la distancia en que se encuentran cada estación. Se sugiere la instalación de estaciones meteorológicas compactas como una estrategia de gestión climática de los sistemas productivos.

Los equipos permiten registrar las principales variables como humedad, temperatura y radiación solar, que sirven para calcular índices agroclimáticos como el Índice Temperatura-Humedad (ITH). Este indicador es ampliamente utilizado para anticipar eventos de estrés calórico que afectan directamente la producción y el bienestar del ganado. Ruiz-Jaramillo et al. (2019) determinaron que, por cada unidad de incremento en el ITH por encima de 72, se reduce entre 0.4 y 0.7 L diarios de producción de leche, siendo las Holstein la raza más afectada. Con esta práctica se permite monitorear las condiciones ambientales locales para tomar decisiones informadas. Además, esto permite ajustar prácticas de manejo en tiempo real, como modificar horarios de ordeño o activar sistemas de enfriamiento como rociadores en las lecherías.

Mejorar la Cultura del Registro

Una gestión adecuada del inventario y registros en fincas ganaderas es necesario y esencial para identificar y mitigar causas específicas de mortalidad en el hato asociadas a condiciones climáticas adversas. Tal control es indispensable para poder identificar patrones de enfermedad y

evaluar riesgos ambientales para tomar decisiones fundamentadas en evidencia. La falta de detalles en los registros, como la causa de muerte y de cual finca, dificulta la implementación de medidas correctivas efectivas.

Huxley (2013) señala que la cojera, asociada comúnmente con lesiones podales, representa una de las principales causas de pérdida de bienestar y productividad en vacas lecheras, y que su manejo efectivo requiere un sistema de monitoreo sanitario constante y detallado. Estos estudios subrayan que los sistemas ganaderos que integran registros sanitarios rigurosos pueden reducir significativamente la incidencia de enfermedades recurrentes, como la pododermatitis, particularmente bajo condiciones climáticas adversas.

Cuadro 9

Prácticas de adaptación frente a la variabilidad y el cambio climático en sistemas lecheros.

Práctica	Tipo de beneficio	Descripción	Fuentes citadas
Fortalecer el manejo de la salud podal	Salud animal, productivo	Reducción de enfermedades podales mediante pediluvios, drenaje y manejo higiénico.	Moreira et al. (2019); Cook (2017)
Optimizar el manejo de pastoreo rotativo	Productivo, ecológico	Mejora del uso de potreros para aumentar la biomasa forrajera y secuestro de carbono.	Villalobos y Arce (2013); Rojas-Solano et al. (2022)
Mejora del sistema silvopastoril	Productivo, climático, bienestar animal	Incorporación de árboles forrajeros para sombra, proteína y reducción térmica.	Zeppetello et al. (2022); Amad y Zentek (2023)
Mejora genética con enfoque en resiliencia	Productivo, salud animal	Cruce Holstein × Jersey para reducir cojeras y mejorar tolerancia térmica.	Solano-López et al. (2018); Ruiz-Jaramillo et al. (2019); Gonzales (2021)
Monitoreo agroclimático	Gestión productiva, bienestar animal	Implementación de estaciones climáticas para el monitoreo preventivo del estrés térmico en el ganado.	Ruiz-Jaramillo et al. (2019)
Mejorar la cultura del registro	Gestión sanitaria, salud animal	Control y análisis de registros para prevenir enfermedades y muertes.	Huxley (2013)

Conclusiones

Al comparar las características biofísicas de las ocho fincas lecheras evaluadas, fue posible identificar diferencias importantes como el tamaño de hato entre fincas como Colga, con 78 vacas en ordeño, y PRD1, con 274, así como el contraste altitudinal entre Rovira, ubicada a 684 msnm, y Colga, que alcanza los 1,266 msnm, lo que refleja contrastes significativos en escala, manejo y las condiciones ambientales bajo las cuales operan las fincas. Estas variaciones permitieron contextualizar integralmente cada unidad productiva, destacando que, aunque todas comparten un sistema basado en pastoreo rotativo con predominancia de la raza Holstein, enfrentan condiciones agrícolas distintas que influyen directamente en su capacidad productiva y en su nivel de resiliencia frente a factores climáticos.

Las variables climáticas con mayor correlación —precipitación, viento y temperatura máxima— no mostraron un efecto uniforme ni constante sobre la producción lechera; sin embargo, bajo condiciones extremas como El Niño o La Niña, su impacto puede intensificarse y afectar negativamente el rendimiento en determinadas fincas.

A pesar de que el análisis de correlación no evidencia una relación directa entre las variables meteorológicas y la producción de leche, las proyecciones climáticas bajo el escenario CMIP6 SSP5–8.5 muestran un incremento progresivo de las temperaturas máximas y mínimas hacia 2040, 2060 y 2080, lo que sugiere una posible reducción futura en la productividad lechera si no se implementan medidas de adaptación adecuadas.

Las simulaciones se estructuraron en torno a los años análogos 2015 (Niño) y 2022 (Niña), identificados con el Índice Multivariado ENSO (MEI). Este índice presentó valores positivos altos en 2015 y 2023, y negativos marcados en 2016–2017 y 2022, coincidiendo con los patrones observados de precipitación tanto en los datos de reanálisis como en los datos observados, lo que permite su uso como años análogos de eventos Niño o Niña en Panamá.

Recomendaciones

Considerar en futuros estudios que algunos países, la gestión de datos climáticos puede requerir varios meses debido a los trámites de solicitud y acceso a los datos. Por esta razón, es importante considerar otras fuentes de información, como la satelital.

Ampliar el alcance de futuras investigaciones incorporando más variables relacionadas con la producción lechera como manejo nutricional y parámetros fisiológicos del ganado. Los datos de estas variables se pueden obtener de los registros de las fincas. En este sentido, es importante implementar o fortalecer la cultura del registro de datos de los hatos lecheros.

Considerar el uso de datos climáticos diarios en futuras investigaciones, ya que el análisis mensual puede ocultar eventos puntuales que impactan directamente en la producción lechera. Trabajar con resoluciones temporales más finas permitiría una mayor precisión en la detección de relaciones significativas entre variables climáticas y productivas.

Se le recomienda a la finca evaluada tomar en cuenta las medidas planteadas a lo largo del estudio, las cuales se fundamentan en literatura y en los resultados obtenidos. En particular, destaca el fortalecimiento del manejo de la salud podal durante la época lluviosa, la mejora genética con enfoque en resiliencia, y la implementación de monitoreo agroclimático local que permita anticipar condiciones adversas y ajustar el manejo en tiempo real.

Referencias

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A. y Hegewisch, K. C. (2018). Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, 5, 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Amad, A. A. y Zentek, J. (2023). The use of *Moringa oleifera* in ruminant feeding and its contribution to climate change mitigation. *Frontiers in Animal Science*, 4, Artículo 1137562. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1137562>
- Belizario-Quispe, G. (2015). Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuencaramis, Puno-Perú. *Revista Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Investigation*, 17(1). <https://doi.org/10.18271/ria.2015.77>
- Bennett, A., McMahon, D. y Muehlhoff, E. (2013). *Milk and dairy products in human nutrition*. Food and agriculture organization on the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bf75d4cd-54ed-45a8-bf1b-71606320f596/content>
- Bernabucci, U., Biffani, S., Buggiotti, L., Vitali, A., Lacetera, N. y Nardone, A. (2014). The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 97(1), 471–486. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6611>
- Bouraoui, R., Lahmar, M., Majdoub, A., Djemali, M. y Belyea, R. (2002). The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Animal Research*, 51(6), 479–491. <https://doi.org/10.1051/animres:2002036>
- Collier, R. J., Dahl, G. E. y VanBaale, M. J. (2006). Major advances associated with environmental effects on dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 89(4), 1244–1253. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72193-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72193-2)
- Cook, N. B. (2017). A Review of the Design and Management of Footbaths for Dairy Cattle. *The Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice*, 33(2), 195–225. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2017.02.004>
- Cowley, F. C., Barber, D. G., Houlihan, A. V. y Poppi, D. P. (2015). Immediate and residual effects of heat stress and restricted intake on milk protein and casein composition and energy metabolism. *Journal of Dairy Science*, 98(4), 2356–2368. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8442>
- Degano, M. F. y Rivas, R. E. (2023). Evaluación de los productos de evapotranspiración disponibles en Climate Engine y del algoritmo Support Vector Machine Regression con datos NASA Power. *Revista De Geología Aplicada a La Ingeniería Y Al Ambiente*(50), e005. <https://doi.org/10.59069/24225703e005>
- Esquivel, H., Ibrahim, M., Harvey, C., Benjamin, T. y Sinclair, F. (2011). Árboles dispersos en los potreros de ranchos ganaderos en un eco-sistema de trópico seco. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 933–941. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-04622011000300006&script=sci_abstract&tlng=es

- Fanzo, J., Davis, C., McLaren, R. y Choufani, J. (2018). The effect of climate change across food systems: Implications for nutrition outcomes. *Global Food Security*, 18, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.06.001>
- Fernández, E., Brooks Moody, M. y Cordón Suárez, E. (2011). Estudio biofísico de la finca académica Snaki - URACCAN, en la comunidad de Moss, municipio de Waspam Río Coco, RAAN. *Ciencia E Interculturalidad*, 2(2), 44–66. <https://doi.org/10.5377/rci.v2i2.572>
- Fernández, F. J., Blanco, M., Ponce, R. D., Vásquez-Lavín, F. y Roco, L. (2019). Implications of climate change for semi-arid dualistic agriculture: A case study in Central Chile. *Regional Environmental Change*, 19(1), 89–100. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1380-0>
- García, Y., Pérez R. y Solano O. (2009). El Niño-Oscilación del Sur y su impacto en la producción de leche en Cuba. *Nereis: revista iberoamericana interdisciplinar de métodos, modelización y simulación*(2), 73–84. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5628722>
- Gauly, M. y Ammer, S. (2020). Review: Challenges for dairy cow production systems arising from climate changes. *Animal : An International Journal of Animal Bioscience*, 14(S1), s196-s203. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003239>
- Gonzales, M. (2021). *Las vacas Jersey tienen diferente microbioma ruminal bajo entornos de estrés por calor*. <https://dellait.com/es/el-microbioma-ruminal-cambia-bajo-entornos-de-estres-por-calor>
- Hausfather, Z. y Peters, G. P. (2020). Emissions - the 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 577(7792), 618–620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>
- Heal, G. y Millner, A. (2014). Reflections. *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(1), 120–137. <https://doi.org/10.1093/reep/ret023>
- Hernández Castro, C. M. (2021). *Series de precipitación y temperatura en Zamorano: tendencias, proyección y relación con el cambio climático* [Proyecto Especial de Graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/c833d7a4-b8b3-4585-9b6b-e137878b29d7/content>
- Huxley, J. N. (2013). Impact of lameness and claw lesions in cows on health and production. *Livestock Science*, 156(1-3), 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.06.012>
- Jiménez-Ferrer, G., Mendoza-Martínez, G., Soto-Pinto, L. y Alayón-Gamboa, A. (2015). Evaluation of local energy sources in milk production in a tropical silvopastoral system with *Erythrina poeppigiana*. *Tropical Animal Health and Production*, 47(5), 903–908. <https://doi.org/10.1007/s11250-015-0806-7>
- Kadokawa, H., Sakatani, M. y Hansen, P. J. (2012). Perspectives on improvement of reproduction in cattle during heat stress in a future Japan. *Animal Science Journal = Nihon Chikusan Gakkaiho*, 83(6), 439–445. <https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2012.01011.x>
- Katsini, L., Muñoz López, C. A., Bhonsale, S., Roufou, S., Griffin, S., Valdramidis, V., Akkermans, S., Polanska, M. y van Impe, J. (2024). Modeling climatic effects on milk production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 225, 109218. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109218>

- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A. y Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Kosztra, B., Büttner, G., Hazeu, G. y Arnold, A. (2019). *The Revised and Supplemented CORINE Land Cover Nomenclature – Updated CLC Illustrated Nomenclature Guidelines*. European Environment Agency. https://land.copernicus.eu/content/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/docs/pdf/CLC2018_Nomenclature_illustrated_guide_20190510.pdf
- Lees, A. M., Lees, J. C., Lisle, A. T., Sullivan, M. L. y Gaughan, J. B. (2018). Effect of heat stress on rumen temperature of three breeds of cattle. *International Journal of Biometeorology*, 62(2), 207–215. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1442-x>
- Lees, A. M., Sejian, V [V.], Steel, C. C., Mader, T. L., Lees, J. C. y Gaughan, J. B. (2019). The Impact of Heat Load on Cattle. *Animals : An Open Access Journal from MDPI*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/ani9060322>
- Li, Y., Li, M., Liu, H. y Qin, W. (2021). Influence of soil texture on the process of subsurface drainage in saturated-unsaturated zones. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(1), 82–89. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211401.5699>
- Lobell, D. B., Burke, M. B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M. D., Falcon, W. P. y Naylor, R. L. (2008). Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science (New York, N.Y.)*, 319(5863), 607–610. <https://doi.org/10.1126/science.1152339>
- Lobell, D. B., Schlenker, W. y Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science (New York, N.Y.)*, 333(6042), 616–620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Moreira, T. F., Nicolino, R. R., Meneses, R. M., Fonseca, G. V., Rodrigues, L. M., Facury Filho, E. J. y Carvalho, A. U. (2019). Risk factors associated with lameness and hoof lesions in pasture-based dairy cattle systems in southeast Brazil. *Journal of Dairy Science*, 102(11), 10369–10378. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-16215>
- Nardone, A., Ronchi, B., Lacetera, N., Ranieri, M. S. y Bernabucci, U. (2010). Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science*, 130(1-3), 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.011>
- Oltenucu, P. A. y Broom, D. M. (2010). The impact of genetic selection for increased milk yield on the welfare of dairy cows. *Animal Welfare*, 19(S1), 39–49. <https://doi.org/10.1017/S0962728600002220>
- Pérez-Hernández, V. M., López-Ortiz, S., Pérez-Elizalde, S., Pérez-Hernández, P., Castillo-Gallegos, E. y Jarillo-Rodríguez, J. (2024). Effect of tree shade on behavior and haircoat temperature of grazing dual-purpose cows in a hot and humid tropical environment. *Agroforestry Systems*, 98(1), 165–178. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00897-1>
- Pulido, R. G. y Leaver, J. D. (2003). Continuous and rotational grazing of dairy cows – the interactions of grazing system with level of milk yield, sward height and concentrate level. *Grass and Forage Science*, 58(3), 265–275. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2494.2003.00378.x>

- Ramírez Villegas, J. A. y Jarvis, A. (2010). *Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method Decision and Policy Analysis Working Paper No. 1*. International Center for Tropical Agriculture. <https://cgspace.cgiar.org/items/be581996-2f4f-4a0c-95da-255bac0d1f93>
- Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T. y Woznicki, S. A. (2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management*, 16, 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>
- Rojas-Solano, J., Brenes-Gamboa, S. y Abarca-Monge, S. (2022). Carbono en el suelo: comparación entre un área de pastos y un bosque. *InterSedes*. Publicación en línea avanzada. <https://doi.org/10.15517/isucr.v23i47.47695>
- Ruiz-Jaramillo, J. I., Vargas-Leitón, B., Abarca-Monge, S. y Hidalgo, H. G. (2019). Efecto del estrés calórico sobre la producción del ganado lechero en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 733–750. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.35984>
- Sejian, V [Veerasamy], Chauhan, S. S., Devaraj, C., Malik, P. K. y Bhatta, R. (Eds.). (2021). *Climate Change and Livestock Production: Recent Advances and Future Perspectives* (1st ed. 2021). Springer Singapore; Imprint Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-9836-1>
- Solano Lopez, M. J. y Villalobos Villalobos, L. A. (2024). Valor nutricional del pasto Estrella Africana con fuentes de fertilización orgánica e inorgánica. *Archivos Latinoamericanos De Producción Animal*, 32(2), 95–107. <https://doi.org/10.53588/alpa.320205>
- Solano-López, M., Vargas-Leitón, B., Saborío-Montero, A. y Pichardo-Matamoros, D. (2018). Factores genéticos y ambientales que inciden en lesiones podales del ganado lechero en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), 123. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.28027>
- Tirado, M. C., Clarke, R., Jaykus, L. A., McQuatters-Gollop, A. y Frank, J. M. (2010). Climate change and food safety: A review. *Food Research International*, 43(7), 1745–1765. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.07.003>
- United Nations. (2015, 29 de julio). *World population prospects: The 2015 revision*. <https://www.un.org/en/development/desa/publications/world-population-prospects-2015-revision.html>
- Vannitsem, S., Liang, X. S. y Pires, C. A. (2025). Nonlinear causal dependencies as a signature of the complexity of the climate dynamics. *Earth System Dynamics*, 16(3), 703–719. <https://doi.org/10.5194/esd-16-703-2025>
- Vargas, R., Cabrera, M., Cicowicz, M., Escobar, P., Hernández, V., Cabrera, J. y Guzmán, V. (2018). Climate risk and food availability in Guatemala. *Environment and Development Economics*, 23(5), 558–579. <https://doi.org/10.1017/S1355770X18000335>
- Villalobos, L. y Arce, J. (2013). Evaluación agronómica y nutricional del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. I. disponibilidad de biomasa y fenología. *Agronomía Costarricense*. Publicación en línea avanzada. <https://doi.org/10.15517/rac.v37i1.10715>
- West, J. W. (2003). Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2131–2144. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X)
- World Bank Climate Change Knowledge Portal. (2025, 28 de mayo). <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/panama/climate-data-projections>

- The World Economic Forum. (2022). *The global risks report 2022*. https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2022.pdf
- Zeppetello, L. R. V., Cook-Patton, S. C., Parsons, L. A., Wolff, N. H., Kroeger, T., Battisti, D. S., Bettles, J., Spector, J. T., Balakumar, A. y Masuda, Y. J. (2022). Consistent cooling benefits of silvopasture in the tropics. *Nature Communications*, *13*(1), 708. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28388-4>

Anexos

Anexo A

Consulta de datos climáticos mediante la plataforma digital "Climate Engine"

The screenshot displays the Climate Engine web application interface. On the left, there is a control panel with the following sections:

- Visualization Layer:** A dropdown menu set to "Raster".
- Variable:** A search bar and several dropdown menus: "Type" (Climate & Hydrology), "Dataset" (TerraClimate - 4km - Monthly), "Variable" (Precipitation (PPT)), and "Units" (millimeters). The "Computation Resolution (Scale)" is set to 4000 m (1/24-deg).
- Processing:** A dropdown for "Statistic (over day range)" set to "Total", and another for "Calculation" set to "Values".
- Time Period:** "Period of Record" is 1958-01 to 2024-12, and "Custom Month Range" is empty. "Start Month" and "End Month" are both set to "Dec".

The main area shows a map of the United States with a blue overlay representing precipitation data. The map includes state names and major cities. At the bottom of the map, there is a Google logo and a scale bar. The footer of the application includes "Powered by Google Earth Engine", "License by (C)", and navigation links: "Get Help", "Get Info", "Partnerships", "Team", "Website", and "Home".

<https://app.climateengine.com/climateEngine>

Anexo B

Ficha de campo para la caracterización biofísica de las fincas evaluadas

Proyecto Especial de Graduación

Caracterización Biofísica

Finca: Gavilán

Número de vacas en ordeño actual: 95 (Revisado el 28/12/2024)

Tipo de pasto: Estrella

Sistema: Pastoreo

Razas: Holstein

Localización de la lechería: Palmira, Boquete, Chiriquí. X: -82.452400 Y: 8.725600

Fisiografía y relieve:

El área presenta un relieve predominantemente colinario, caracterizado por formas onduladas que incluyen colinas y áreas de meseta con altitudes relativamente uniformes.

Morfometría:

Elevación (msnm): 981

Superficie de uso agrícola (Ha): ≈43.27

Clasificación textural superficial del suelo:

Textura#1: Areno franco

X: -82.450916 Y: 8.724371

Textura#2: Areno franco

X: -82.439904 Y: 8.719474

Textura#3: Areno franco

X: -82.440575 Y: 8.719851

Hidrología:

La finca cuenta con acceso a la Quebrada Eliot el cual usa para la lechería y para riego.

Vegetación:

La finca presenta una vegetación dominada por especies arbóreas como pino (*Pinus spp.*), poro (*Erythrina spp.*), aguacatillo (*Persea spp.*), y cina (*Parkinsonia aculeata*). La mayoría de estos árboles han sido plantados como parte de las actividades de manejo y reforestación de la finca. Entre ellos, predominan las especies de pino y poro.

Proyecto Especial de Graduación

Caracterización Biofísica

Finca: Rovira

Número de vacas actual: 170 (Revisado el 28/12/2024)

Tipo de pasto: Vacarí

Sistema: Pastoreo

Razas: Holstein

Localización de la lechería: Rovira, Dolega, Chiriquí. X: -82.513149 Y: 8.636273

Fisiografía y relieve:

El área presenta un relieve predominantemente plano, caracterizado por una topografía suavemente ondulada y sin la presencia de montañas visibles o pendientes pronunciadas.

Morfometría:

Elevación (msnm): 684 ± 4

Superficie (Ha): ≈70.41

Clasificación textural superficial del suelo:

Textura#1: Franco limoso

X: -82.513522 Y: 8.636254

Textura#2: Areno franco

X: -82.512982 Y: 8.635758

Textura#3: Areno franco

X: -82.513828 Y: 8.636480

Hidrología:

La finca cuenta con acceso al Rio David el cual usa para la lechería.

Vegetación:

La vegetación predominante en el área incluye especies plantadas como macano (*Diphysa americana*), bala (*Couroupita guianensis*) e higo (*Ficus spp.*), que representan la mayor parte de la cobertura arbórea. Además, de manera natural, se encuentran árboles autóctonos como el nance (*Byrsonima crassifolia*), distribuidos de forma más dispersa.

Proyecto Especial de Graduación

Caracterización Biofísica

Finca: Guabal

Número de vacas actual: 100 (Revisado el 28/12/2024)

Tipo de pasto: Estrella

Sistema: Pastoreo

Razas: Holstein

Localización de la lechería: Palmira, Boquete, Chiriquí. X: -82.447413 Y: 8.723404

Fisiografía y relieve:

El relieve del área se caracteriza por un paisaje colinario con ondulaciones marcadas y visibles. Presenta pendientes que oscilan entre moderadas y pronunciadas, sin la presencia de montañas cercanas.

Morfometría:

Elevación (msnm): 982
Superficie (Ha): ≈68.19

Clasificación textural superficial del suelo:

Textura#1: Areno franco	X: -82.447740	Y: 8.724856
Textura#2: Areno franco	X: -82.448053	Y: 8.724232
Textura#3: Franco limoso	X: -82.447767	Y: 8.724315

Hidrología:

La finca cuenta con acceso a la quebrada Eliot el cual usa para la lechería y para riego.

Vegetación:

La vegetación presente en el área incluye cedro (*Cedrela odorata*), eucalipto (*Eucalyptus spp.*), macano (*Diphysa americana*), mango (*Mangifera indica*) e higo (*Ficus spp.*). Es importante señalar que el eucalipto y el macano fueron plantados intencionalmente, mientras que las demás especies ya formaban parte de la cobertura vegetal natural del sitio.

Proyecto Especial de Graduación

Caracterización Biofísica

Finca: Principal

Número de vacas actual: 137 (Revisado el 28/12/2024)

Tipo de pasto: Estrella

Sistema: Pastoreo

Raza: Holstein

Localización de la lechería: Palmira, Boquete, Chiriquí. X: -82.458409 Y: 8.734606

Fisiografía y relieve:

El relieve del área es predominantemente colinario, con ondulaciones suaves y continuas que caracterizan el paisaje.

Morfometría

Elevación (msnm): 1048
Superficie de uso agrícola (Ha): ≈61.80

Clasificación textural superficial del suelo

Textura#1: Areno franco	X: <u>-82.457915</u>	Y: <u>8.735274</u>
Textura#2: Areno franco	X: <u>-82.457520</u>	Y: <u>8.734630</u>
Textura#3: Areno franco	X: <u>-82.457903</u>	Y: <u>8.735732</u>

Hidrología:

La finca cuenta con acceso al Rio Colga el cual usa para la lechería y para riego.

Vegetación:

La vegetación del área está compuesta principalmente por especies plantadas como macano (*Diphysa americana*), roble (*Quercus spp.*), aguacatillo (*Persea spp.*) y pino (*Pinus spp.*), establecidas por la finca. Estas especies forman una cobertura diversa que combina elementos arbóreos y arbustivos, proporcionando beneficios ecológicos y funcionales para el manejo del terreno.

Proyecto Especial de Graduación

Caracterización Biofísica

Finca: Márquez

Número de vacas actual: 98 (Revisado el 28/12/2024)

Tipo de pasto: Estrella

Sistema: Pastoreo

Razas: Holstein

Localización de la lechería: Palmira, Boquete, Chiriquí. X: -82.480348 Y 8.732880

Fisiografía y relieve:

El relieve del área se caracteriza por estar situado entre dos grandes colinas, que flanquean la zona, creando un valle.

Morfometría:

Elevación (msnm): 1065

Superficie (Ha): ≈44.31

Clasificación textural superficial del suelo:

Textura#1: Areno franco

X: -82.480629 Y: 8.732628

Textura#2: Areno franco

X: -82.480789 Y: 8.733261

Textura#3: Areno franco

X: -82.481422 Y: 8.732991

Hidrología:

La finca cuenta con acceso al Río Kisinga el cual usa para la lechería.

Vegetación:

La vegetación del área incluye especies sembradas por la finca, como macano (*Diphysa americana*), mango (*Mangifera indica*) y limón agrio (*Citrus aurantiifolia*). Además, se encuentran de manera natural especies autóctonas como canillo (*Guarea spp.*), ziuva (*Alseis spp.*) y roble (*Quercus spp.*)

Proyecto Especial de Graduación

Caracterización Biofísica

Finca: Colga

Número de vacas actual: 78 (Revisado el 28/12/2024)

Tipo de pasto: Estrella

Sistema: Pastoreo

Razas: Holstein

Localización de la lechería: Palmira, Boquete, Chiriquí. X: -82.472444 Y: 8.749239

Fisiografía y relieve:

El relieve del área se encuentra entre dos grandes colinas, que delimitan la zona y dan lugar a un paisaje con pendientes suaves y áreas planas en el centro.

Morfometría:

Elevación (msnm): 1266

Superficie (Ha): ≈39.97

Clasificación textural superficial del suelo:

Textura#1: Areno franco

X: -82.473065 Y: 8.748757

Textura#2: Areno franco

X: -82.473348 Y: 8.749036

Textura#3: Areno franco

X: -82.473221 Y: 8.749626

Hidrología:

La finca cuenta con acceso al Río Colga el cual usa para la lechería.

Vegetación:

La vegetación del área está compuesta exclusivamente por especies nativas, incluyendo mamecillo (*Melicoccus bijugatus*), cenizo (*Plumeria alba*), arraiján blanco (*Symphonia globulifera*) y guayabo (*Psidium guajava*). Estas especies forman un ecosistema natural que refleja las características propias de la región, proporcionando importantes funciones ecológicas como refugio para la fauna local y contribución al equilibrio ambiental.

Proyecto Especial de Graduación

Caracterización Biofísica

Finca: PRD1

Número de vacas actual: 274 (Revisado el 28/12/2024)

Tipo de pasto: Estrella

Sistema: Pastoreo

Razas: Holstein

Localización de la lechería: Rovira, Dolega, Chiriquí. X: -82.533325 Y: 8.691806

Fisiografía y relieve:

El relieve del área es predominantemente plano, sin la presencia visible de montañas o colinas cercanas.

Morfometría:

Elevación (msnm): 1048
Superficie (Ha): ≈ 96.13

Clasificación textural superficial del suelo:

Textura#1: Areno franco	X: <u>-82.533075</u>	Y: <u>8.691004</u>
Textura#2: Areno franco	X: <u>-82.532743</u>	Y: <u>8.691723</u>
Textura#3: Areno franco	X: <u>-82.533022</u>	Y: <u>8.692421</u>

Hidrología:

La finca cuenta con acceso al Rio David y el Rio Majagua el cual usa para la lechería.

Vegetación:

La vegetación del área combina especies sembradas, como eucalipto (*Eucalyptus spp.*), nogal (*Terminalia amazonia*), macano (*Diphysa americana*) y nance (*Byrsonima crassifolia*), con la especie nativa arraiján (*Symphonia globulifera*).

Proyecto Especial de Graduación

Caracterización Biofísica

Finca: PRD2

Número de vacas actual: 135 (Revisado el 28/12/2024)

Tipo de pasto: Estrella

Sistema: Pastoreo

Razas: Holstein

Localización de la lechería: Rovira, Dolega, Chiriquí. X: -82.527926 Y: 8.684918

Fisiografía y relieve:

El relieve de esta área es similar al de PRD1, ya que ambas se encuentran en proximidad y comparten características topográficas. Ambas zonas presentan un relieve plano, sin la presencia visible de montañas o colinas cercanas.

Morfometría:

Elevación (msnm): 956
Superficie (Ha): ≈ 109.08

Clasificación textural superficial del suelo:

Textura#1: Areno franco	X: <u>-82.529268</u>	Y: <u>8.683230</u>
Textura#2: Areno franco	X: <u>-82.529247</u>	Y: <u>8.682670</u>
Textura#3: Areno franco	X: <u>-82.529195</u>	Y: <u>8.682143</u>

Hidrología:

La finca cuenta con acceso al Rio David y el Rio Majagua el cual usa para la lechería.

Vegetación:

La vegetación de esta finca es similar a la de PRD1, ya que ambas están ubicadas en proximidad y comparten la misma distribución de especies. En ambas áreas, se encuentran árboles sembrados como eucalipto (*Eucalyptus spp.*), nogal (*Terminalia amazonia*), macano (*Diphysa americana*) y nance (*Byrsonima crassifolia*), junto con la especie nativa arraiján (*Symphonia globulifera*). Esta composición refleja una continuidad en las características vegetales entre las dos fincas.

Anexo C

Instrumento de percepción aplicado a trabajadores de las fincas evaluadas

Proyecto Especial de Graduación**Percepción de trabajadores**

Nombre:

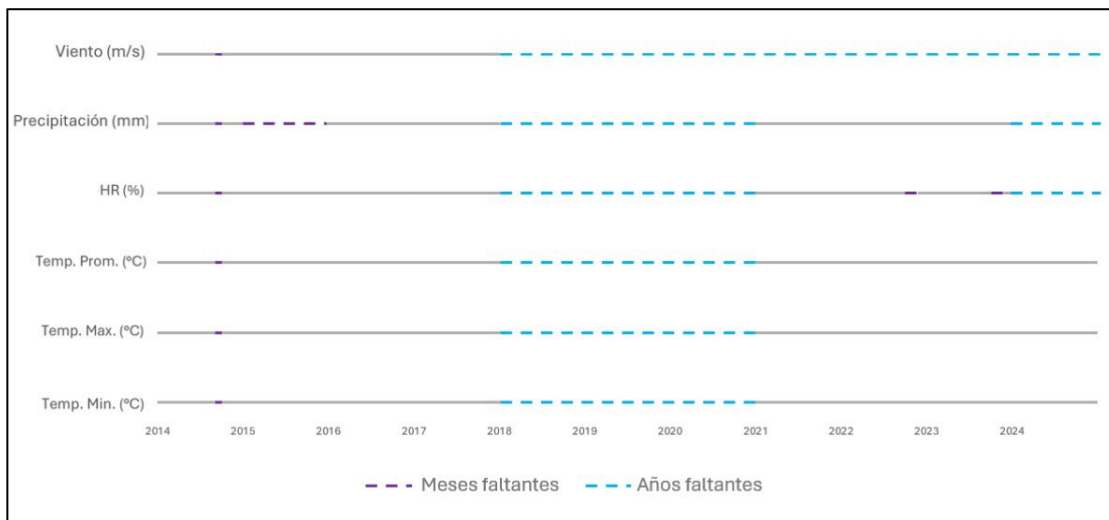
Años de experiencia en la producción lechera:

Finca:

1. ¿Cómo ha percibido los cambios climáticos en los últimos años?
2. ¿Qué aspectos climáticos (temperatura, lluvias, etc.) cree afecta más en la producción lechera y/o en la salud del ganado?
3. ¿Conoce usted una práctica o medida preventiva que se ha implementado en la finca para mitigar los efectos del clima en su producción?
4. ¿Cómo visualiza el futuro de la producción lechera en la finca frente a la variabilidad climática?

Anexo D

Preprocesamiento de revisión y tratamiento de datos climáticos faltantes



Anexo E

Extracción de información climática desde la plataforma “Climate Knowledge Portal”

<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/panama/climate-data-projections>

