

UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL.
SEDE ATENAS

ÁREA DE TECNOLOGÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ANIMAL

PROPUESTA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN LECHEROS EN CRECIMIENTO, MEDIANTE LA MOLDELACIÓN
DE LAS TECNOLOGÍAS NAMAS, UTILIZANDO UN MODELO MULTI-AGENTE

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ANIMAL

JUAN PABLO MUÑOZ FONSECA
JOAQUÍN ARTAVIA CHAVES

ATENAS, COSTA RICA
MARZO 2021

DECLARACIÓN JURADA

Nosotros Joaquín Artavia Chaves portador de la cédula de identidad número 1-1355-0683 y Juan Pablo Muñoz Fonseca portador de la cédula de identidad número 5-0343-0146 estudiantes de la Universidad Técnica Nacional, UTN en la carrera de licenciatura en Ingeniería en Sistemas de Producción Animal, conocedores de las sanciones legales con que la Ley Penal de la República de Costa Rica castiga el falso testimonio y el delito de perjurio que pueda ocasionarse ante el Director de Carrera y quienes constituyen el Tribunal Examinador de este trabajo de investigación, juramos solemnemente que este trabajo de investigación es una obra original respetando las leyes y que ha sido elaborada siguiendo las disposiciones exigidas por la Universidad Técnica Nacional, UTN así como con los derechos de autor.

En fe de lo anterior, firmamos en la ciudad de Atenas, a los dieciséis días del mes de abril de dos mil veinte.

Juan Pablo Muñoz Fonseca
Cédula 5-0343-0146

Joaquín Artavia Chaves
Cédula 1-1355-0683

TRIBUNAL EXAMINADOR

César Solano Patiño, Msc, PhD

Carlos Salazar Aguilar

Pável Bautista Solís

Edwin Pérez Gutiérrez

DEDICATORIA

Queremos dedicar este trabajo a nuestras familias, que nos apoyaron desinteresadamente a todo lo largo de nuestra carrera.

Queremos agradecer a Dios por habernos dejado llegar hasta aquí y de una forma muy sincera a todas aquellas personas que de alguna u otra forma contribuyeron a la realización de este trabajo.

A nuestros tutores Pável Bautista Solís y Pierre Bommel, a los señores(as) productores(as) del asentamiento La Poma, por habernos brindado su atención y amistad, durante el desarrollo de nuestro trabajo.

Contenido

DECLARACIÓN JURADA	II
DEDICATORIA.....	IV
INTRODUCCIÓN	5
Objetivo general.....	9
Objetivos específicos	10
II. MARCO TEÓRICO.....	11
Adaptación al cambio climático	11
Plan Nacional de Descarbonización.....	13
Descarbonización.....	14
Medidas tecnológicas.....	16
Producción láctea en Costa Rica	17
NAMA Ganadería.....	26
Concepto de Eco-competitividad en el NAMA.	26
Medidas pro actividad ganadera sostenible y mejora de la competitividad.....	30
Potencial de Mitigación del NAMA Fincas Ganaderas.....	31
Potencial Transformacional del NAMA Ganadería	32
Manual Operativo de NAMA Ganadería: Modelo multi-agente de sistemas de producción lecheros especializados para evaluar las tecnologías NAMA	34
III. MARCO METODOLÓGICO	40
Área de estudio.....	40
Ubicación geográfica.....	40
Condiciones climáticas y servicios básicos del asentamiento La Poma	40

Selección del caso de estudio.....	41
Asentamiento La Poma.....	41
Procedimiento metodológico.....	42
Necesidad de un modelo.....	44
Lenguaje Unificado de Modelado (UML).....	46
Lenguaje de programación Smalltalk.....	46
Entorno de desarrollo VisualWorks.....	47
Plataforma de modelado multi-agente CORMAS (COMmon-pool Resources and Multi-Agent Systems).....	47
Desarrollo del modelo multi-agente: NAMA-PRV.....	48
Objetivo del modelo NAMA-PRV.....	53
Descripción del modelo.....	54
Funcionamiento del modelo.....	58
Supuestos del modelo NAMA-PRV.....	59
Procedimiento de la simulación.....	60
IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
Diagnóstico de los sistemas de producción del Asentamiento La Poma 2018 ..	63
Simulaciones del Modelo multi-agente.....	67
<i>Visualización del simulador</i>	67
Resultados de simulaciones.....	71
Aportes del modelo para una estrategia de adaptación al cambio climático.....	77
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
Conclusiones.....	79
Recomendaciones.....	80
VI. REFERENCIAS.....	82

VII. ANEXOS 86

 Cronograma de actividades a realizar..... 86

Índice de tablas

Tabla 1. Consumo per cápita de leche en Costa Rica.....	26
Tabla 2. Entidades consideradas en la modelación multi-agente del sistema de pastoreo rotacional en una finca lechera modelo del cantón de Tilarán, Guanacaste, Costa Rica.....	51
Tabla 3. Configuración de los escenarios utilizados en la simulación multi-agente de sistemas de pastoreo rotacional.....	56

Índice de figuras

- Figura 1. Ecuación lineal de producción de materia seca del pasto XX utilizada para parametrizar el modelo multi-agente (Villalobos y Arce, 2013)52
- Figura 2. Diagrama de clase para la modelación de la tecnología de pastoreo rotacional en una finca modelo del cantón de Tilarán, Guanacaste, Costa Rica57

Índice de gráficos

Gráfico 1. Porcentaje de productividad del hato del asentamiento La Poma.	55
Gráfico 2. Estado de producción de las fincas del asentamiento La Poma.	56
Gráfico 3. Caracterización de las fincas del asentamiento La Poma.	57
Gráfico 4. Comercialización de leche producida fincas del asentamiento La Poma.	58

RESUMEN

Es innegable que el cambio climático representa uno de los mayores retos actuales, siendo una fuente de presión para el medio ambiente y las sociedades humanas. Entre los posibles efectos para todo el mundo causados por esto se tiene amenazas a la producción de alimentos causadas por condiciones meteorológicas cambiantes y amenaza de inundaciones catastróficas como consecuencia del aumento del nivel del mar. (Naciones Unidas 2017).

Las Acciones Nacionales de Mitigación Apropriadas (NAMA, por sus siglas en inglés) de Fincas Ganaderas Costarricense son una práctica encaminada a lograr un sector más eco-competitivo, impulsando la adopción de tecnologías y medidas bajas en emisiones; favoreciendo el incremento de niveles de productividad e ingresos en los ganaderos y mejorando su calidad de vida, aminorando el riesgo de eliminación de importantes sumideros de carbono localizados en las fincas ganaderas (MAG 2013).

En relación con lo anterior, se pretende desarrollar una propuesta de adaptación para los sistemas de producción lecheros en crecimiento, para que puedan mitigar los efectos de los impactos del cambio climático mediante la modelación de tecnologías NAMAs en el cantón de Tilarán, Guanacaste, Costa Rica.

El cambio climático plantea una amenaza nueva de la cual no hay experiencia previa a los habitantes de los países en desarrollo, quienes ya tienen problemas con la gestión de sus suministros alimentarios. Con todas estas condiciones adversas y cambiantes, la humanidad ha necesitado implementar medidas preventivas para mitigar los efectos negativos. Muchas actividades han tenido que adaptarse, como el caso de la ganadería, actividad económica principal

en algunas zonas en donde uno de los problemas más graves es la disponibilidad del agua. (FAO, 2013).

Aunque es el único sector con capacidad de mitigar sus emisiones de carbono, mediante el posible almacenamiento de carbono en el tejido vegetal y en los suelos, el sector agropecuario es el segundo mayor emisor de gases de efecto invernadero (GEI). Además, en una economía abierta, debe ser alentado un cambio de gestión empresarial y tecnológico tendiente a aumentar su participación en los mercados. La descarbonización es un factor en el desacoplamiento de la economía nacional de con los efectos ambientales negativos. Existe una relación entre el valor económico de la producción ganadera con las emisiones de GEI generadas en el proceso

El ENA 2019 determinó que el pastoreo es el principal sistema de producción de las fincas con ganado vacuno, presente en el 94,8% de las fincas de producción de carne, el 79,0% de las fincas productoras de leche, y el 93,9% de las fincas de ganado de doble propósito.

Además, el pasto natural es utilizado en el 61,5% de las fincas con ganado de doble propósito, el 50,8% de las fincas de ganado productos de leche, y el 48,6% de las fincas de ganado de carne. Resulta entonces que el pasto natural es el principal sistema de alimentación para hatos de todos los propósitos

Las técnicas NAMA aplicables a Fincas Ganaderas Costarricense son una tendencia a la implantación de tecnologías de nivel bajo y medio, esto es tecnologías adecuadas a la realidad del pequeño y mediano productor, que promueven la reducción de los GEI originados en la industria ganadera, protegiendo o mejorando los sumideros de carbono que se localizan en las fincas productivas de este sector agrario, lo cual debe redundar en un incremento de la productividad y por tanto de los ingresos, y de la calidad de vida del productor.

Con la finalidad de mejorar la comprensión de la problemática de adaptación al cambio climático de los sistemas de producción lecheros en crecimiento de la población de estudio de esta investigación, se realizaron una serie de acciones con la participación de los productores. En primer lugar, en noviembre de 2017 se llevó a cabo un taller con productores del Asentamiento La Poma para explicar el desarrollo de esta investigación, el desarrollo del proyecto de la Universidad Nacional: “Facilitando la implementación de tecnologías de producción agropecuaria sostenible en fincas de pequeños productores ganaderos del cantón de Nicoya, Costa Rica como estrategia para la adaptación a la sequía y el cambio climático (PRO-RBA)”. Como resultado de este taller se obtuvo el consentimiento de los productores para apoyar el desarrollo de este trabajo.

La meta de este modelo es producir una representación simplificada de un sistema de pastoreo rotacional en una finca lechera modelo. El modelo resultante, posibilitara comparar y analizar diversas configuraciones sistemas de rotación (PRV), una de las estrategias NAMAs ganadería, para determinar la disponibilidad de consumo de materia seca diaria requerida por los animales para su producción ya sea carne o leche. Este modelo tiene como finalidad, ser una herramienta para el cumplimiento del objetivo general y los objetivos específicos de esta propuesta. Además, se ha probado su efectividad para favorecer el aprendizaje de técnicos pecuarios.

En síntesis, los beneficios de un buen manejo de pasturas y del pastoreo rotacional actúan en sinergia. Este sistema es usado desde hace muchos años en la lechería. El sistema rotativo posibilita una mayor carga animal, y favorece un mejor estado nutricional de los animales (que comen pasto tierno cada día). Favorece una mayor ganancia de peso y mayor producción de leche, en función del y estado de salud del ganado y su calidad genética. Se gestiona la disponibilidad del pasto a lo largo del año. Se evita la erosión del suelo cuando éste queda descubierto en el verano. Se permite el secuestro de carbono en los

pastos y menores emisiones de metano por animal, que aprovecha mejor el forraje más tierno (de mayor digestibilidad) en producción de leche.

En conclusión, se determinó que la tecnología NAMA que los productores más utilizan es la de pastoreo. Rotacional, El modelo NAMA-PRV es una herramienta de modelación que facilita la toma de decisiones para la implementación de la tecnología NAMA de pastoreo rotación.

El modelo NAMA-PRV, se puede mejorar incorporando variables ambientales para analizar la influencia de la dinámica climática en los sistemas productivos, valorar la transformación del modelo NAMA-PRV en una aplicación amigable con el usuario.

INTRODUCCIÓN

Es innegable que el cambio climático representa uno de los mayores retos actuales, siendo una fuente de presión para el medio ambiente y las sociedades humanas. Entre los posibles efectos para todo el mundo si tiene amenazas a la producción de alimentos causadas por condiciones meteorológicas cambiantes y amenaza de inundaciones catastróficas como consecuencia del aumento del nivel del mar (Naciones Unidas 2017).

Se ha señalado, en este contexto, que la producción bovina es uno de los factores que propician el efecto invernadero. Menos conocido por el público es el efecto contrario: El efecto cambio climático afecta adversamente la ganadería. El incremento de la temperatura y los cambios en la precipitación afectan la nutrición del bovino, al consumir pasturas más lignificadas. La producción, así como los aspectos sanitarios, sociales y ambientales se ven afectados (Garzón 2011).

Se reporta normalmente que el cambio climático está desmejorando la producción de carne en las zonas secas de Costa Rica. Pero los mayores estragos se están presentado en el hato lechero, por causa de las nuevas condiciones climáticas que debilitan a los animales, y por lo tanto desmejoran la producción diaria (Pérez 2015).

Se indica en escenarios desarrollados por el Índice de Temperatura y Humedad, que en los últimos años las condiciones ambientales indican un aumento en el peligro de estrés térmico, o *golpe de calor*, donde la temperatura corporal de los animales alcanza niveles peligrosos, ya que no es posible la eliminación de calor producido o de entrada para compensarla.

El enfriamiento por evaporación de los mamíferos no es eficaz en los climas húmedos y calurosos, en los cuales los animales tienen problemas para perder calor. Estos periodos de estrés térmico causan disminuciones en aspectos como reproducción, producción láctea, consumo de alimento, actividad física y crecimiento. Se ha identificado al estrés por calor como el factor de mayor importancia en un considerable aumento de abortos y mortalidad embrionaria en vacas, hecho que ocurre en los meses de verano y los siguientes en muchos países. El efecto final es la ocurrencia de significativas pérdidas económicas en los hatos (Verde y Hernández y López 2008).

El agua es un elemento indispensable en la supervivencia de los animales. Su papel en los niveles de producción es igualmente incuestionable. Sin embargo, la ganadería tiene un impacto sustancial en el desmejoramiento de la disponibilidad del agua y su contaminación, en toda la cadena de actividades que van desde la producción de pastos e insumos hasta el procesamiento de los productos animales (Pérez 2008).

La incidencia de enfermedades sobre los animales está muy relacionada con los efectos indirectos del cambio climático. Es previsible que el clima tenga un efecto directo en la incidencia de agentes etiológicos o sus vectores, causantes de procesos parasitarios o infecciosos en los animales. La mayor temperatura prevista permitirá a los vectores transmisores de infecciones extenderse hacia zonas más elevadas y más altas latitudes. Los objetivos de la selección genética pueden verse modificados ya que genotipos más resistentes o tolerantes serán favorecidos con esta nueva carga sanitaria (Nieto y Santamarta 2003).

No obstante, una estrategia eficiente para la reducción de emisiones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) por unidad de producto animal puede ser el aumento de la productividad bovina. Es un enfoque eficiente para mejorar la productividad animal y aminorar las emisiones de estos GEI, permitir una nutrición

adecuada, además de mejorar el potencial genético de los animales por medio de cruces planificados o selección dentro de las razas y el buscar el logro potencial genético por medio de mejoras en la eficiencia reproductiva, la sanidad animal y la vida reproductiva útil (Hristov 2013).

Actualmente existe la opción de crear modelos aplicables a la evaluación de diferentes escenarios de cambio climático y sus impactos en la ganadería. Factores como calidad, disponibilidad y manejo de los recursos naturales, especialmente del agua, así como en sus posibles efectos en las dinámicas sociales y económicas, pueden ser estudiados en modelos especialmente elaborados (Gómez y Fernández 2009).

Como parte de su proceso de innovación de los negocios y mejoras en sus actividades, las empresas actualmente utilizan cada vez más procesos de simulación. Son empleados para analizar y comprender características de sus actividades y productos, para visualizar predicciones futuras del sistema representado, y contar con medios para sugerir y evaluar sugerencias de mejora a los procesos de innovación. Un modelo de simulación computarizado posibilita la interacción de diversos actores con procesos y tecnologías variadas, pudiendo ser experimentados y evaluados numerosos escenarios que de otra forma no serían accesibles, facilitando y haciendo más precisa la toma de decisiones (Fullana y Urquia 2008).

En la simulación, se diseña un modelo partiendo del conocimiento disponible sobre un sistema real, para tener la posibilidad de experimentar con él y entender su comportamiento. Es especialmente valiosa la capacidad de anticipación que el modelo posibilitará sobre el sistema modelado. Con la capacidad de anticipación es posible evaluar estrategias, gestiones alternativas, comparar resultados y tomar decisiones apoyadas en el comportamiento del modelo tendientes a optimizar inversión de recursos, reducir costos, aminorar vulnerabilidades, daños y pérdidas, enmarcadas en los periodos, actividades y prioridades de interés (IICA 2015).

Debe tenerse siempre presente que un modelo es básicamente una herramienta que representa una simplificación de la realidad, en la cual se muestran y manipulan los aspectos más relevantes de la realidad o ignoran los aspectos no relevantes para el objetivo de la simulación (Corral 2011). Además, a diferencia de los sistemas de ecuaciones diferenciales, los modelos multi-agentes no requieren conocimientos matemáticos. Además, sus dimensiones espaciales ofrecen la posibilidad de representar mapas dinámicos que evolucionan con el tiempo. Este tipo de modelo puede utilizarse luego con los actores en el campo que comprenden sus mecanismos y pueden apropiarse de estas herramientas (Bommel et al., 2011).

De (Corral 2014), se infiere que se modela para lograr un mejor nivel de entendimiento de la realidad que se quiere representar. Por su naturaleza intrínseca, la realidad suele ser de un volumen y complejidad que hacen imposible que sea entendida en un tiempo razonable. El nivel de detalle presente en la realidad puede ser igualmente muy profundo y su estructura innecesariamente compleja para el observador, para el cual suele ser perfectamente viable trabajar con una "realidad simplificada".

El Modelo de Contabilidad Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM) es un ejemplo de estas herramientas computacionales. Se diseñó por la FAO para mejorar la comprensión de la producción de GEI originadas en la producción ganadera en toda su cadena de suministros, localizar esferas de intervención y establecer prioridades entre ellas. El GLEAM está constituido por cinco módulos que representan los elementos constituyentes de la cadena de suministros ganadero: Módulo de hato, módulo de piensos, módulo de estiércol, módulo del sistema y el módulo de asignaciones (FAO 2013).

En Costa Rica, se identifican 45.780 fincas ganaderas, ocupando 1.863.657 ha. (INEC, Corfoga y Senasa 2012). Estas representan un 36,5% del territorio del

país. El ganado cárnico produce alrededor del 1,5% al PIB (MAG 2007). La producción de carne y lácteos brindan empleo a 100,000 trabajadores directos y 150,000 indirectos, lo cual constituye el 14% de la fuerza laboral costarricense (BCCR 2013). Para la mayoría de las familias involucradas en estas actividades, esta es una importante fuente de ingresos (MAG 2013).

Las Acciones Nacionales de Mitigación Apropriadas (NAMA, por sus siglas en inglés) de Fincas Ganaderas Costarricense son una práctica encaminada a lograr un sector más eco-competitivo, impulsando la adopción de tecnologías y medidas bajas en emisiones; favoreciendo el incremento de niveles de productividad e ingresos en los ganaderos y mejorando su calidad de vida, aminorando el riesgo de eliminación de importantes sumideros de carbono localizados en las fincas ganaderas (MAG 2013).

En esta propuesta, debido a los hechos de interés ambiental mencionados anteriormente, es de gran interés el estudio en el área de sistemas lecheros para lograr un análisis de las prácticas actuales y su impacto en la naturaleza, usando herramientas de modelación. Además, se desea encontrar alternativas a las prácticas actuales que disminuyan tal efecto sobre el ambiente utilizando el concepto NAMA en fincas ganaderas. Para lograr esto, se trabajará con un asentamiento de pequeños productores lecheros, ubicados en Tilarán, Guanacaste.

Objetivo general

Desarrollar una propuesta de adaptación para los sistemas de producción lecheros en crecimiento, para que puedan mitigar los efectos de los impactos del cambio climático mediante la modelación de tecnologías NAMAs en el cantón de Tilarán, Guanacaste, Costa Rica.

Objetivos específicos

1. Determinar la problemática de adaptación al cambio climático de los sistemas de producción lecheros en crecimiento mediante un diagnóstico de finca.
2. Desarrollar una propuesta de adaptación para evaluar las tecnologías NAMAs, mediante el diseño, la implementación y el uso de un modelo multi-agente.

II. MARCO TEÓRICO

Adaptación al cambio climático

Diversos autores han identificado las complejas causas y potenciales consecuencias del cambio climático, llegando a conclusiones alarmantes.

De la misma manera que el problema demográfico, la globalización o las diferencias norte sur, el cambio climático, es uno de los principales problemas sociales de la actualidad. Sus principales responsables son las actividades humanas, por los efectos medioambientales y sobre la salud de la población y, sobre todo, porque tiene su origen en la desigualdad entre naciones, en la injusticia y la inequidad ante el control y uso de recurso y de responsabilidad ante el futuro. Que debe asegurarse con el desarrollo tecnológico (Useros, 2012).

El cambio climático plantea una amenaza nueva de la cual no hay experiencia previa a los habitantes de los países en desarrollo, quienes ya tienen problemas con la gestión de sus suministros alimentarios. Con todas estas condiciones adversas y cambiantes, la humanidad ha necesitado implementar medidas preventivas para mitigar los efectos negativos. Muchas actividades han tenido que adaptarse, como el caso de la ganadería, actividad económica principal en algunas zonas en donde uno de los problemas más graves es la disponibilidad del agua (FAO, 2013).

Costa Rica se proclama líder internacional en materia de medio ambiente, por la creación del Sistema de Áreas Protegidas y entre otros, el esquema de Pago por Servicios Ambientales. En el año 2007, su gobierno anunció además la meta de ser un país carbono neutral para el 2021. El último inventario nacional reportó, en el 2005, un total bruto de emisiones de 12.285.900 toneladas métricas de

Gases de Efecto Invernadero (GEI) y, tras restar los sumideros de carbono a nivel nacional, un total neto de 8.779.200 toneladas métricas de GEI (IMN 2008).

El término *adaptación* está definido por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) como la respuesta a condiciones climáticas presentes o futuras, que origina ajustes en los sistemas humanos o naturales, reduciendo el daño causado y ampliando las oportunidades positivas (CARE, 2010).

Es necesario analizar la actual exposición al temor y estrés climáticos, así como un conjunto de modelos de impacto climático futuros, pues la adaptación de los sistemas humanos requiere una serie de acciones que necesitan del compromiso de una amplia gama de participantes que actúen en muchos niveles, en casi la totalidad de sectores (CARE, 2010).

La consciencia del entorno sociopolítico, institucional y físico, y de que comunidades, hogares y personas presentan vulnerabilidades es de gran importancia. Las políticas encaminadas a estos actores de cambio tienen el potencial de inducir efectos notables y duraderos en las economías de los países en desarrollo, al fijar el rumbo de políticas adecuadas a estos agentes principales, tornando a las personas inversores y custodios del medio ambiente. Debe articularse bien el uso y manejo sostenible de los ecosistemas terrestres, bosques, montañas, la tierra, los suelos y la biodiversidad (Hristov y Troy, 2013).

Decenas de millones de personas tienen como medios de sustento a los bosques, los cuales proporcionan agua y aire limpio, son refugio para la biodiversidad y mitigan el cambio climático. Los bosques tienen el potencial de absorber cantidades importantes de dióxido de carbono en su biomasa, productos y suelos, actuando así como sumideros de carbono. En principio, pueden almacenar el carbono para siempre (CARE, 2010).

Plan Nacional de Descarbonización

Según Groves et al (2020), habiendo la mayoría de los países ratificado el Acuerdo de París, que pretende estabilizar el aumento de la temperatura del planeta bajo 2 °C, preferiblemente alrededor de 1,5 °C, nuestro país se ha adherido a la descarbonización global con su Plan Nacional de Descarbonización. Para esto las naciones deben lograr cero emisiones netas de dióxido de carbono (CO₂) para 2050 y reducir grandemente las emisiones de otros gases de efecto invernadero (GEI) antes de finalizar el siglo.

El CO₂ es capaz de permanecer en la atmosfera durante siglos, por eso es el principal gas de efecto invernadero. Es necesario reducir el uso de combustibles fósiles y aumentar las capacidades de los sumideros de carbono, por ejemplo los bosques, para poder alcanzar las cero emisiones netas de dióxido de carbono.

La temperatura mundial seguirá subiendo mientras por razones económicas globalmente se libere más CO₂ a la atmósfera del que pueden capturados sumideros de carbono. No obstante, se ha demostrado la viabilidad técnica de alcanzar para el año 2050 las cero emisiones netas de carbono, logrando beneficios para el desarrollo y creación de trabajos en américa latina.

En el caso de Costa Rica las iniciativas de descarbonización podrían originar beneficios para la salud derivados una menor polución, mayores servicios ecosistémicos por mejoras y conservación de bosque y ahorro de divisas por uso de combustibles.

Los planes de descarbonización son una guía que permite la los ministerios involucrados, coordinando con los principales actores interesados de los sectores públicos y privados identificar y vencer barreras y desafíos políticos, económicos, de planificación y reglamentación. Así son generadas estrategias que tienen las siguientes características:

1. Uso de los recursos renovables hídricos, solares y eólicos de nuestro país en la generación de energía limpia para todos los sectores económicos.
2. Para los recursos forestales, mejorar y preservar sus capacidades de captura de carbono.
3. Aumentar el acceso y la eficiencia del transporte público.
4. Los desechos sólidos y líquidos se deben reutilizar, luego de recolectarlos y tratarlos.
5. Disminuir el uso de energía y las emisiones de carbono industriales, agrícolas y ganaderos al mejorar los procesos de producción relacionados.

Descarbonización

De Chacón (2019) tenemos que el cambio en el clima global es un hecho innegable que tendrá influencia en el desarrollo de Costa Rica. Por eso la acción climática es eje transversal en futuras políticas públicas. Nuestro país tiene el compromiso de una NDC (Contribución Prevista Nacionalmente Determinada) ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, esto representa un compromiso para la ganadería y en general para el sector agropecuario.

Aunque es el único sector con capacidad de mitigar sus emisiones de carbono, mediante el posible almacenamiento de carbono en el tejido vegetal y en los suelos, el sector agropecuario es el segundo mayor emisor de gases de efecto invernadero (GEI). Además, en una economía abierta, debe ser alentado un cambio de gestión empresarial y tecnológico tendiente a aumentar su participación en los mercados.

La descarbonización es un factor en el desacoplamiento de la economía nacional de con los efectos ambientales negativos. Aunque de manera no

necesariamente coordinada con las iniciativas gubernamentales, ha existido un proceso de descarbonización desde los años 90 en el sector ganadero. Durante esa década disminuyó un 45% el área de los pastizales, la población disminuyó un 40%, creció la cobertura boscosa y el volumen de producción. La producción total aumento un 72% a pesar de un decrecimiento del hato lechero. La producción de carne aumentó. En el siguiente decenio se estabiliza el hato nacional, por lo que la producción de carne mejora. A partir del 2000 se incrementa la producción primaria y el rendimiento de la industria. Crece levemente el hato nacional, hay un 30% de disminución del área de pasturas, continúan creciendo los volúmenes de producción. La producción de leche sube un 3,5% anual, la de carne al 1,3% anual. La cobertura forestal sigue creciente hasta que en 2014 llega al 52%. Según el Censo Agropecuario 2014, el bosque primario o secundario intervenido llega al 24% del total en la finca ganadera promedio. Las mejoras e los indicadores de producción se debe a varios factores, entre se señala que la ganadería en el país se basa en el pastoreo, se introdujeron variedades más productivas de pasto, administración más eficiente y mejores razas. Se da el uso de sistemas de lechería especializados y alimentos balanceados.

Se muestra aquí el consolidado nacional. El Estudio de Línea de Base, SIDE/MAG/BM contiene estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) partiendo del nivel micro (animales), siendo el metano la principal fuente, toma en cuenta tipos de animales y dietas alimenticias. En un segundo nivel de agregación, las fincas, con hatos de composición variada, relacionados con los sistemas productivos. Aquí se suman las emisiones de otros gases originados por excretas, uso de energía y fertilización. Varias fincas con sistemas productivos similares, pero con diferentes escalas, y dentro del mismo ecosistema, constituyen el siguiente nivel de agregación, que es agrupación. Todas las agrupaciones, de varios sistemas productivos, conforman el nivel de región. Es posible ya a este nivel efectuar análisis integrales de emisiones y del secuestro. Se concluye a nivel nacional con la agregación de todas las regiones. (Chacón, 2019)

Año	Brunca	Central	Chorotega	Huetar Allántica	Huetar Norte	Pacífico Central	Total general
2018	86.882,12	233.940,69	379.130,96	89.324,99	450.938,50	62.162,49	1.302.379,74
2019	87.678,80	247.229,68	377.932,21	88.802,75	469.399,47	65.676,35	1.336.719,27
2020	89.814,48	255.041,43	398.290,17	89.677,77	503.111,46	66.692,62	1.402.897,93
2021	91.528,77	252.398,98	396.478,04	90.415,66	512.814,27	67.434,58	1.411.070,30
2022	93.309,33	252.532,53	401.173,35	93.141,64	519.475,17	68.090,56	1.427.722,59
2023	94.184,51	253.176,30	403.070,16	94.357,27	521.297,47	68.710,19	1.434.795,90
2024	95.305,46	255.964,79	407.384,17	95.583,97	528.378,80	69.700,53	1.452.318,08
2025	95.742,06	253.430,05	409.108,55	95.694,07	524.901,80	70.011,06	1.446.581,20
2026	96.597,11	253.618,55	411.208,55	96.608,67	527.581,77	70.706,96	1.454.221,62
2027	92.823,16	254.010,35	399.134,55	97.676,99	530.222,86	71.343,27	1.461.650,97
Promedio	92.823,16	251.134,33	399.057,87	93.128,38	508.812,16	68.079,86	1.413.035,76

Fuente Estudio de Línea de Base, SIDE/MAG/BM.

Tabla 1. Emisiones de GEI por región y año del 18 al 27 en toneladas CO2 equivalente.

Fuente: Estudio de Línea de Base, SIDE/MAG/BM.

Medidas tecnológicas

Si se mantiene el comportamiento del sector, los estudios de caracterización y de Línea Base de emisiones de GEI y los diagnósticos indican que no se producirán fuertes cambios en los próximos años. Esto va contra la realidad de la economía global que señala la libre competencia y por ello la necesidad de transformación. Para el balance de emisiones GEI, el leve crecimiento del hato nacional implicaría una tendencia al aumento. Es necesario la práctica de innovaciones en el manejo de las fincas y la alimentación del ganado principalmente, para que el sector ganadero reduzca las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de producto, mantenga o mejore su equilibrio de emisión-secuestro de carbono, a la vez que mejore la productividad y la rentabilidad. Un proceso de consulta, partiendo de la oferta y optimización de prácticas que han demostrado costo efectividad adecuado, que favorecen la

mitigación y que tienen un trasfondo científico ha permitido la identificación de opciones tecnológicas. Se identificaron por medio de una encuesta y su validación de dio en todo el país, en talleres regionales teniendo en cuenta representatividad agroecológica. Investigadores, extensionistas y productores participaron en estos talleres.

Área de mejora	Prácticas
Manejo de pasturas	Pastoreo racional
	Control sistemático de malezas
	Fertilización química u orgánica
Incorporación de árboles y arbustos a la finca	Árboles dispersos en el potrero
	Bosquetes, bosques riparios
	Cercas vivas, sistemas silvopastoriles
	Bancos de Leguminosas arbustivas
Plantaciones forestales	Teca
	Melina
Bancos forrajeros	Caña de azúcar
	Sorgo forrajero
	King grass
	Cratylia y otras.
Conservación de forrajes	Ensilaje en bolsa
	Pacas
	Silo
Manejo del hato	Control de sanidad
	Manejo reproductivo
	Genética adaptada
	Suplementación estratégica y diferenciada
	Uso racional de concentrados
Administración	Decisiones de reducción del hato
	Gestión de riesgos, conservación de agua
	Manejo de costos

Fuente adaptada de ENGBC, SIDE y otros.

**Tabla 2. Tecnologías identificadas con potencial de descarbonización.
Fuente: Adaptada de ENGBC, SIDE y otros.**

Producción láctea en Costa Rica

Se asocia a los sistemas tradicionales de producción ganadera con una baja productividad y rentabilidad además de una serie de externalidades negativas para

el ambiente como contaminación de aguas, erosión de suelos, reducción de la biodiversidad y emisión de gases de efecto invernadero.

En Costa Rica, las fincas ganaderas han adoptado diferentes innovaciones, que pueden clasificarse como:

- a) Casos exitosos: Las innovaciones que han sido adoptadas por más del 50% de las fincas.
- b) Casos que están en proceso de adopción: Las que se encuentran entre el 20 y 50% de las fincas.
- c) Casos de innovaciones en experimentación: Se han implementado en menos del 20% de fincas.

El impacto en productividad y rentabilidad de las fincas, en costos de implementación y el tiempo que lleva la tecnología en el entorno de los productores es lo que define el éxito de la adopción de estas innovaciones (MAG 2010).

Los productores lácteos nacionales disponen de forrajes en la mayor parte de las regiones productoras durante todo el año. Cuentan con una adecuada capacitación y un nivel aceptable de organización. Su nivel tecnológico es bueno. Los productores han diversificado su línea, por lo que producen tanto para el consumo interno como para la exportación, cuentan así mismo con mercados estables para la leche líquida y con experiencia de comercialización.

La ganadería bovina de carne, leche y doble propósito, incluida en el subsector pecuario representa una parte importante de la economía nacional. Conjuntamente, la actividad ganado vacuno y leche representan el 1,3% del Producto Interno Bruto (PIB) y constituyen el 17,6% del valor agregado de la

producción agropecuaria, ocupando el tercer puesto en importancia en la generación de este valor agregado (MAG, 2013).

De INEC (2019) se tiene la siguiente información, tomada de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2019:

1 023 953 animales del hato nacional está destinado a la producción de carne (62,7%), siendo esta la principal actividad pecuaria de Costa Rica. En orden descendiente de importancia continúan el ganado de doble propósito con 353 868 cabezas (21,7%), productores de leche con 253 144 animales (15,4%) y 2 502 animales de trabajo (0,2%). En total se reportan 1 633 467 en el país.

El 72,3% de los animales del hato nacional son hembras, siendo esto positivo para la reproducción y el crecimiento del hato.

En el año 2019 en hato nacional se incrementó vía nacimientos con 448 529 cabezas. El 50,1% de estos nacimientos corresponden a machos, y el 49,9% a hembras. Del total de nacidos, el 53,6% se destinó a ganado para carne, el 23,8% a ganado de doble propósito y el 22,6% a la producción de leche.

Los machos constituyeron también el 54,9% de las pérdidas de este año. Para las edades menores de un año y de un año a menos de dos años, las principales causas de pérdidas fueron las plagas (62,7%) y las enfermedades (28,7%).

La causa principal de pérdida de animales adultos con un 25,2% es el robo, hurto o destace.

El pastoreo es el principal sistema de producción de las fincas con ganado vacuno, presente en el 94,8% de las fincas de producción de carne, el 79,0% de

las fincas productoras de leche, y el 93,9% de las fincas de ganado de doble propósito.

El pasto natural es utilizado en el 61,5% de las fincas con ganado de doble propósito, el 50,8% de las fincas de ganado productos de leche, y el 48,6% de las fincas de ganado de carne. Resulta entonces que el pasto natural es el principal sistema de alimentación para hatos de todos los propósitos.

La inestabilidad en precios, afectación de fenómenos climáticos, mercados cada vez más exigentes en cuanto a la calidad e inocuidad de los productos y en manejo ambiental, son situaciones difíciles que han venido afectando el desarrollo de las actividades ganaderas de los pequeños y medianos productores.

Por lo anterior, estos pequeños y medianos productores ganaderos necesitan apoyo para adaptarse a los cambios en el entorno que le exigen más eficiencia y mayores inversiones en su actividad, para no ser expulsados del mercado. De no poder adecuarse, deberán abandonar el mercado, provocando un impacto negativo en el medio social, afectando desfavorablemente los índices de empleo y pobreza, ya que las regiones donde se lleva a cabo esta actividad (como las regiones Huetar Norte y la región Chorotega, con un 43% y 9% respectivamente de la producción nacional lechera) reportan altos índices de pobreza en Costa Rica (MAG, 2010).

Costa Rica tiene uno de los consumos per cápita promedio de leche más altos de América Latina: 217,11 kg/año en el año 2016, según la Cámara de Productores de Lecha (Tabla 3). Este alto nivel se ha logrado gracias a la autosuficiencia del país en la producción lechera, la cual hace posible un desarrollo sostenido en el consumo, en el comercio y en la agroindustria del sector (Barrientos y Villegas, 2010).

La industria láctea de Costa Rica puede considerarse formada por dos tipos de empresas diferentes: Las cooperativas y las empresas de capital privado. Ambas están muy unidas a la producción del agro y durante todo el año compran materia prima a asociados y productores. Sus características son:

- a) Cooperativas: Tienen un alto grado de integración con la producción. Se caracterizan por la estabilidad en la compra de materia prima durante todo el año a sus asociados o proveedores. Su producción es muy diversificada. Algunas de estas cooperativas son: Cooperativa de Productores de Leche R.L. (Dos Pinos) y Coopeleche R.L.
- b) Empresas de capital privado: Su producción se especializa en la elaboración de un producto específico (quesos, helados, entre otros). Son empresas especializadas del sector industrial que se comportan con mayor flexibilidad en la compra de la materia prima, con dependencia de las condiciones del mercado, tal es el caso de compañías como: Sigma Alimentos, Monteverde, Blanco y Negro, Quesos de Calidad Holanda, Coprolac – Tiqueso, Los Alpes, entre otras, especializadas en quesos; y Central Heladera Díaz, Indulac (Pops), en helados (Barrientos y Villegas 2010).

En el Sector informal artesanal, según estimaciones, un 40% de la producción total de leche es para autoconsumo o bien se comercializa por medio de lecheros, comerciantes o intermediarios. La producción que se comercializa como leche cruda, llega al consumidor a través de lecheros tradicionales o el mismo productor, directamente en entrega domiciliar cuando los recorridos permiten que llegue fresca. Una parte de la leche se transforma en natilla y queso fresco, y es llevado al consumidor final por comerciantes o intermediarios (Barrientos y Villegas, 2010).

En el sector artesanal son distinguibles tres tipos de agentes económicos:

- a) Vendedores de leche cruda (lecheros): Se abastecen de insumos de su misma zona, ya que venden un producto de muy corta duración.
- b) Productores artesanales de queso crudo: La producción de quesos es un medio para la conservación de la leche. Venden directamente al consumidor y a pequeños comerciantes. No tienen vínculos con la industria y accedan el mercado de una manera informal. Son explotaciones familiares, de larga tradición, el ordeño es manual. Tienen un bajo nivel tecnológico de procesamiento.
- c) Mini-plantas industrializadoras de quesos frescos: Empresas de tamaño pequeño. Quesos pasteurizados blancos, frescos, semiduros y duros son sus productos básicos. Como subproductos tienen natilla y suero para la alimentación animal. Proveen proveedores estables de materias primas. Su mercado primario es el área metropolitana, en supermercados y comercios similares. Su nivel tecnológico es el adecuado a este mercado.

Para los productores artesanales de queso crudo, la variabilidad en la calidad del producto es grande, al no existir una relación entre estos productores y la industria o el comercio formal, el resultado es que no existen estándares de calidad normalizados, y la calidad mínima aceptable termina siendo determinada por el comprador (Barrientos y Villegas, 2010).

Las raíces de este problema están en que gran cantidad de productores de leche, queso y natilla no tienen una infraestructura ni equipos adecuados para una producción higiénica. De ahí la importancia de poder contar con programas especiales, de las instituciones del sector público MAG, INA, que impulsen un mejoramiento de la calidad e inocuidad de estos productos. De otra forma, la normativa existente recomienda el cierre de la explotación. Este es un riesgo muy grande para estos productores.

Muchos productores de queso son también compradores. Compran queso a precio bajo, pero con especificaciones de mínima calidad, para reprocesarlo en su industria, no tomando, de manera deliberada, consideraciones sobre la calidad del producto.

Se complica más la situación cuando, en estos casos los programas de mejora de las queserías artesanales y las disposiciones de salud aplicadas a los productores, se ven bloqueadas cuando al intentar la venta del producto, los compradores no aceptan leches o quesos refrigerados, o a pesar de una mejor calidad e inocuidad del producto no mejoran su precio.

En su mayoría, las queseras rurales tienen debilidades en infraestructura, capacitación tecnológica, uso de sistemas de análisis de riesgos y control de puntos críticos, y mercadeo de consorcio.

El país produce diariamente 2,4 millones de litros de leche. El 60 por ciento de esta producción es comercializada por empresas lácteas formales. Con pasteurización y valor agregado. No obstante, alrededor de 800 mil litros se transforman artesanalmente en quesos frescos y 200 mil litros se venden como leche cruda sin pasteurizar, según el informe de Políticas y Acciones del Sector Agropecuario.

Factores como las condiciones del entorno mundial, la capacidad competitiva del país, las condiciones de los actores de las diversas agro cadenas y las condiciones de los factores de producción relacionado con la sostenibilidad económica en relación a los recursos naturales de que se dispone, crean una serie de desafíos para la actividad lechera del país (Barrientos y Villegas 2010).

La Cámara Nacional de Productores de Leche (2016) reporta el consumo per cápita de leche en Costa Rica, se muestra en la Tabla 3.

Año	Producción (Kg)	Exportaciones (Leche Fluida Kg)	Importaciones (Leche Fluida Kg)	Población	Consumo per cápita (Kg)
2012	1,014,643,000.00	216,475,075.78	113,095,797.85	4,654,148.00	195,80
2013	1,066,288,000.00	214,752,167.94	114,337,494.51	4,706,433.00	205,22
2014	1,076,951,000.00	241,673,633.59	118,912,020.20	4,757,606.00	200,56
2015	1,113,708,987.44	218,658,379.65	143,822,183.36	4,807,850.00	216,08
2016	1,151,721,581.30	250,565,870.12	160,598,407.30	4,890,379.00	217,11

Tabla 3. Consumo de leche per cápita en Costa Rica

Fuente: Cámara Productores de Leche 2016.

La producción láctea genera ingresos adicionales a los productores, mejora su alimentación a la vez que posibilita el uso de mano de obra familiar. La unidad de producción láctea es un sistema cuyos componentes son la dimensión del hato, grado de capitalización, nivel de producción, eficiencia reproductiva, nivel de

tecnología y comercialización, Estos componentes interactúan entre sí y se relacionan con el ambiente (Herrera, 2010).

La formación de un hato lechero con vacas de excelente eficiencia productiva y reproductiva, requiere una gran organización de la familia, conocimientos técnicos básicos, involucración en los procesos productivos y un muy alto grado de dedicación.

Para producir sin dañar el ambiente y cumpliendo las exigencias del mercado actual, los productores lácteos necesitan instalaciones o adaptaciones mínimas. Éstas son necesarias para el manejo del ganado. Hay que tomar en cuenta el clima de la región, la estructura y el tamaño del hato, el sistema de explotación y los montos de la inversión (Herrera, 2010).

Los factores climáticos que impactan el confort del animal son la temperatura, la radiación solar y la precipitación. El uso de sombras protege al ganado de una intensa radiación solar, deben evitarse encharcamientos o exceso de lodo, para garantizar la higiene corporal de los animales y de la leche.

La estructura y tamaño del hato señalan las dimensiones y capacidad de las instalaciones. El equipo de ordeño debe ser de acuerdo con los requerimientos y tener garantía de mantenimiento.

Brucelosis, parasitosis y mastitis son problemas sanitarios que deben ser controlados con eficiencia por el productor lácteo. También, debe prevenir la presencia de fiebre de leche y otras enfermedades metabólicas (acidosis, cetosis).

Se debe contar con comederos acordes al tipo de alimento que proporcione al ganado, cercanos al piso, además de bebederos (Herrera 2010). Producir leche con vacas de buenas calidades, bien alimentadas y sanas, crea bienestar económico y empleo para la familia. La leche, además de ser un alimento de gran

calidad, se puede transformar en otros productos alimenticios con los que se puede comercializar.

NAMA Ganadería

Concepto de Eco-competitividad en el NAMA.

Las técnicas NAMA aplicables a Fincas Ganaderas Costarricense son una tendencia a la implantación de tecnologías de nivel bajo y medio. Esto es tecnologías adecuadas a la realidad del pequeño y mediano productor, que promueven la reducción de los GEI originados en la industria ganadera, protegiendo o mejorando los sumideros de carbono que se localizan en las fincas productivas de este sector agrario, lo cual debe redundar en un incremento de la productividad y por tanto de los ingresos, y de la calidad de vida del productor.

Como ya se ha consignado, en el país las 45.780 fincas ganaderas identificadas cubren un área que representa el 36,5 % del territorio nacional, el ganado cárnico contribuye con un 1,5% al PIB, y los trabajos directos o indirectos que esta industria genera suman el 14% de la fuerza laboral costarricense. Estas actividades son una fuente de ingresos de importancia para las empresas o familias que las realizan (MAG, 2007).

De la interpretación de los datos suministrados por el IMN en 2008, los lineamientos y políticas en materia de medio ambiente, que incluyen la meta de convertir a Costa Rica en una nación carbono neutral para el año 2021, han permitido la captura de 3.506.700 toneladas de GEI. Esto significa que los sumideros de carbono en la nación han capturado el equivalente al 28,5% de la emisión nacional de GEI (IMN, 2008).

Este contexto y meta ambiciosa han fomentado un entorno acogedor para el desarrollo de Las Estrategias de Desarrollo Bajo en Carbono (LCDS, por sus

siglas en inglés) y Medidas de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMAS), que contribuyen a cumplir con requisitos de mitigación de los sectores más significativos en emisiones de GEI con el fin de lograr los objetivos nacionales, y a orientar a estos sectores en el rumbo del desarrollo sostenible, se ven fortalecidas con el anterior contexto y ambiciosa meta.

Como resultado de un marco político e institucional forjado por estrategias y aspiraciones nacionales y sectoriales, y esfuerzos avanzados de las muchas partes interesadas, lideradas por el MAG en el actual desarrollo de prácticas ganaderas sostenibles, se tiene un entorno favorable a la iniciativa que aquí se expone.

En el sector agropecuario nacional, existen aportes significativos que han surgido de la intencionalidad de las instituciones gubernamentales y de su visión de desarrollo, como parte de los programas y políticas del marco de la Estrategia de Desarrollo Bajo en Carbono (MAG y MINAE, 2013).

No hay impedimentos para la coexistencia de un sector ganadero más ecológicamente competitivo compatible con las estrategias nacionales y sectoriales nombradas anteriores en múltiples niveles:

- a) Luego del sector energético, el sector agropecuario es el segundo emisor nacional de GEI. Es responsable por cerca del 37% de las emisiones nacionales, 4.603.000 t de CO₂. De esas, el 82% corresponde a la ganadería. La mitigación en un sector que representa alrededor de un 30% de las emisiones nacionales es un componente crítico para alcanzar la meta Carbono neutralidad en el 2021 y un desarrollo con bajas emisiones. El sector agropecuario es uno de los sectores de intervención prioritarios del eje estratégico de mitigación de la Estrategia Nacional de Cambio Climático de Costa Rica.

- b) La Política de Estado para el Sector Agropecuario y Desarrollo Rural Costarricense 2010-2021, del 2011, diseñada por el MAG, impulsa la política sectorial hacia la meta nacional de carbono neutralidad, y fijó el Cambio Climático y Gestión Agroambiental como uno de sus cuatro pilares. El MAG, además de múltiples proyectos de ganadería sostenible, ha elaborado un Plan de acción para Cambio Climático y Gestión Agroambiental 2011-2014. En el presente se ejecuta la Estrategia Ganadera de Desarrollo Bajo en Carbono (LCDS) conjuntamente con el sector privado. Estas acciones son tendientes a la mitigación y a la adaptación.
- c) Costa Rica, por medio de su gobierno, está desarrollando un Mercado Doméstico de Carbono Voluntario. Hay avances en los mecanismos de las operaciones de certificación de carbono neutral y la producción de créditos de carbono de Costa Rica. El sector agropecuario puede producir y comprar Unidades Costarricenses de Compensación (UCC).

Además, durante cinco o más años, los sectores académicos, público, privado y otros, han ejecutado proyectos de campo y de investigación, incluyendo proyectos piloto de reconocimiento de prácticas ganaderas sostenibles.

Los múltiples proyectos de colaboración existentes, de financiamiento internacional, gubernamental, institucional y del sector privado, deben ser ideados teniendo en cuenta la compatibilidad entre ellos, para lograr maximizar el uso de recursos y los resultados.

Un marco NAMA, acordado y con acciones comunes y responsabilidades designadas para los diferentes actores de este sector puede ser de suma utilidad para evitar separación o duplicidad de esfuerzos de investigación o campo de los diferentes participantes del sector que pueden presentarse, pues aunque existen acciones de mitigación identificadas, su implementación a la escala deseada no ha

sido posible por motivos financieros, institucionales, culturales, tecnológicos y de otros tipos (MAG y MINAE, 2013).

En la implantación de estas acciones de mitigación para la emisión de GEI, una limitación importante es que en su mayoría, los productores no cuentan con activos y ahorros para invertir en nuevas medidas y tecnologías. Sus recursos son muy limitados y el acceso al crédito es mínimo. Expertos han identificado y validado muchas de estas barreras, de carácter económico, social, institucional y tecnológico.

La ausencia de tecnologías y medidas bajas en emisiones, o la aplicación incorrecta de las mismas, constituyen otras barreras identificadas. Existen limitaciones en el conocimiento técnico de los productores desde una perspectiva socio-institucional, lo que dificulta la captura de GEI y aplicación medidas de mitigación. Se suman a estas barreras la incertidumbre de un reconocimiento del mercado por productos ganaderos diferenciados, la resistencia al cambio de las prácticas habituales, y nociones culturales contrarias a las medidas de mitigación que se proponen.

Además, en el aspecto tecnológico, pese a los esfuerzos actuales, existen vacíos en los datos de línea base, falta de conocimiento sobre la captura de carbono por especies forestales locales específicas (NAMA Ganadería, 2013).

Existen nuevas tecnologías y medidas a usar con el potencial de mitigar GEI, y aunado a un contexto favorable basado en voluntad política y del sector público, aumentar la productividad de la actividad económica y servir como acciones de adaptación al cambio climático.

Es de esperar que prácticas ganaderas correctamente dirigidas aumenten significativamente los ingresos y mejoren la calidad de vida de más de 34.000 productores nacionales, esto es el 80% de las fincas dentro del alcance del NAMA,

potenciando la competitividad de este sector, que se caracteriza por la escasez de recursos para invertir en esa necesidad (CATIE, 2010).

Con superiores conocimientos para guiar las acciones garantizando la mitigación de GEI y co-beneficios múltiples, mayores capacidades de los productores ganaderos, y comprobando que las medidas propuestas en las fincas piloto funcionan, se lograría una adopción a gran escala de las medidas NAMA y se lograría un máximo rendimiento de los resultados positivos con estas prácticas.

Medidas pro actividad ganadera sostenible y mejora de la competitividad

Teniendo en cuenta su potencial de mitigación, factibilidad técnica, potencial transformacional y co-beneficios han considerado las siguientes tecnologías y medidas bajas en emisiones:

- a) Planes de fertilización mejorados: La aplicación de éstos de manera más eficiente; implementación de otras estrategias como abonos orgánicos, purines o nuevas tecnologías incluyendo fertilizantes de lenta liberación pueden disminuir las emisiones GEI de las fincas lecheras, ya que el uso de fertilizantes tradicionales es una fuente importante de estas emisiones.
- b) Rotación de apartos y uso de cercas vivas: La división de apartos en las fincas ganaderas permiten la rotación de ganado. Este proceso permite que los pastos crezcan más saludables y que los suelos capturen más carbono. Además, cercas vivas y árboles son también elementos de captura de carbono (además de proporcionar sombra a los animales).
- c) Mejora de pasturas: Mediante la mejora de las especies de forrajes, no sólo más carbono es capturado por los pastos y por sus raíces más grandes y extensas en suelos, sino que también las dietas de los rebaños mejoran,

aumenta la productividad y mejoran las tasas de reproducción. A esta medida se debe acompañar con la rotación de apartos.

- d) Sistemas silvopastoriles: La plantación de árboles dispersos en las zonas de pastoreo, proporcionando sombra para los animales y captura de carbono. Por el uso de los árboles al final de su vida útil, la siembra debe ser periódica.

Medidas adicionales también significativas y aplicables, están siendo incluidas dentro de la Estrategia Ganadera Nacional de Desarrollo Bajo en Carbono (LCDS, Low Carbon Development Strategy) ganadera y su inclusión futura en el marco NAMA. Entre ellas se cuenta la gestión y genética (CATIE, 2010).

Potencial de Mitigación del NAMA Fincas Ganaderas

La adopción de medidas bajas en emisiones antes detalladas brinda a las fincas ganaderas el potencial de mitigar GEI. Además, al alcanzar una mayor producción, el posible desarrollo de incentivos económicos y de mercado, reducen los riesgos y favorecen el mantenimiento de áreas boscosas que pueden extenderse, y que constituyen sumideros de carbono importantes dentro de las fincas ganaderas.

No obstante, debe tenerse en consideración que las estimaciones primeras de la potencial mitigación en el marco NAMA Ganadería son un proceso en desarrollo y hay márgenes de incertidumbre presentes que pueden originar variaciones en consideraciones futuras.

Según estimaciones, las medidas NAMA propuestas, si se implementaran en el 80% de las fincas, en un periodo de quince años, potencialmente implicarían un

total de 12.923.718 t de CO₂. De este total, en un plazo mayor de tiempo, las medidas de reducción representan 1.243.578 t CO₂e. Se estima una captura de carbono adicional en las fincas de 11.680.140 t CO₂e (MAG y MINAE, 2013).

En el año 2021, la primera etapa de esta implementación de medidas en el 10% de las fincas nacionales tendría un potencial de mitigación que se estima en 833.966 t CO₂e. En la actualidad, dentro de las fincas ganaderas hay áreas boscosas naturales que se extienden por 451.278 ha y áreas de plantación forestal de 45.342 ha en el interior de fincas ganaderas.

De estas áreas boscosas y plantaciones forestales intrafincas, el 80% sumideros en un período de quince años, que totaliza sumando a 43.650.000 t CO₂e. El NAMA Ganadería, por sus valores anuales de fijación de carbono, promueve el mantenimiento de estas áreas (MAG y MINAE, 2013).

Potencial Transformacional del NAMA Ganadería

Las prácticas de producción ganadera bajas en emisiones de GEI son conocidas por los productores. Sin embargo, los productores generalmente no adoptan estas medidas. La razón es que comúnmente no se tiene acceso a financiamiento y asistencia técnica que apoye estas medidas.

Se pronostica un crecimiento de la actividad económica ganadera, principalmente por los precios crecientes de la carne, que favorecen el aumento de la oferta. Entonces, un escenario como de costumbre (BAU, "Business as usual") produciría más emisiones proporcionalmente al crecimiento del hato y la posibilidad de la sustitución de los sumideros ubicados en las fincas ganaderas por áreas de pastos.

Por las condiciones seguidamente descritas, el NAMA va a transformar el escenario BAU:

- a) Fortalecimiento de Medición, Reporte y Verificación (MRV) y la línea base existente crean un sistema intensivo en conocimiento e introducen a los productores locales en la ganadería de precisión. Con mayor disponibilidad de más datos y con el control de las prácticas de producción ganadera que permiten adaptarse a las características de cada finca logrando así un uso más eficaz de los recursos.
- b) Si se implementan en el 80% de las fincas ganaderas durante 15 años, las medidas de mitigación representaran 12.923.718 t CO₂e según estimaciones. Esto contribuirá a desarrollar carbono neutralidad y desarrollo bajo en emisiones, metas del país.
- c) La aplicación de las prácticas recomendadas incrementa la productividad y los ingresos de los ganaderos sin el aumento proporcional de las emisiones GEI al crecer la actividad económica. Esto incentiva a los ganaderos a innovar y favorece la sostenibilidad del negocio, brindando retroalimentación a las prácticas de mitigación adoptadas.
- d) El diseño y puesta en operación de incentivos de mercado e incentivos económicos que permitan la superación de obstáculos importantes, mejorando la oportunidad de reconocer y aprovechar oportunidades.
- e) Nuevos mercados y un precio Premium son asequibles como resultado de la comercialización potencial de productos carbono neutral o diferenciados por ser producidos con bajas emisiones.
- f) La disponibilidad de incentivos para permitir y ampliar las áreas forestales en las fincas ganaderas.

- g) Aumentar las capacidades y el intercambio de experiencias hacen que los productores, funcionarios y técnicos relacionados con la actividad productiva estén mejor calificados.
- h) La replicabilidad del proyecto y el desarrollo de MRV son útiles como entrada para una actividad más productiva en la región.
- i) Al integrarse los esfuerzos de los sectores privado, académico y público, y formarse acuerdos y alianzas en estos sectores, se evita duplicación de esfuerzos y se logra maximizar el impacto conseguido.
- j) Ejecutar instrumentos financieros haciendo uso de la Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (Fittacori), Cámaras, u otras organizaciones para activar recursos existentes y facilitar el acceso al crédito y los fondos.

Si se ejecuta una serie de medidas de reducción de los GEI, se generan variados beneficios indirectos. La mayor parte de las medidas de mitigación pertenecientes al concepto NAMA son en sí mismas acciones de adaptación al cambio climático (CATIE, 2010).

Manual Operativo de NAMA Ganadería: Modelo multi-agente de sistemas de producción lecheros especializados para evaluar las tecnologías NAMA

El Plan Operativo se genera a partir de la construcción de los indicadores Medición, Reporte y Verificación (MRV) del Piloto Nacional (PN). Estos indicadores permiten establecer la situación inicial y los siguientes avances de la finca ganadera en los renglones de balance de GEI, producción y rentabilidad.

Este Plan Operativo está diseñado para obtener información en cantidad, tiempo, forma y calidad para la elaboración de los indicadores MRV, que se destinan a entes gubernamentales y organismos internacionales (NAMA ganadería, 2013).

El monitoreo que se efectúa en el Plan Operativo posibilita registrar y cuantificar la situación inicial y las variaciones productivas y de sostenibilidad ambiental y económica de la finca. Con esto se evalúa la efectividad de cada componente intervenido, y se posibilita efectuar ajustes que sean necesarios para la replicación de la experiencia (CATIE, 2010).

Los planes piloto que se desarrollan en Ganadería de Carne y Doble Propósito (Corfoga-MAG-PNUD-INTA) y en Ganadería de Leche (CNPL-MAG) producirán entre 10 y 11 indicadores por la interacción de múltiples variables en diversos formatos. Pueden categorizarse de la siguiente forma:

- a) Seguimiento de productividad de la actividad ganadera y/o lechera.
- b) Seguimiento de rentabilidad de la actividad ganadera y/o lechera.
- c) Seguimiento de resiliencia o capacidad de adaptación a los efectos del cambio climático global (CCG).

Para las fincas lecheras, objeto de esta propuesta, el Fertirriego, Establecimiento de Bancos Forrajeros y Cosecha de Agua son medidas aplicables. Lo anterior sin detrimento de otras necesidades de la finca, que también pueden ser abordadas por otros procedimientos.

Se definen dos niveles de monitoreo. El primero es responsabilidad de los técnicos que dan soporte a la finca, y permite tomar acciones preventivas y correctivas de las tecnologías promovidas y el desempeño del productor. El

segundo nivel capta la información unificada a nivel nacional y regional. Siendo el MAG/Corfoga o al MAG/CNP el responsable del procesamiento de esta información, con la finalidad de dar reportes de desempeño de los planes piloto.

Respondiendo a la importancia de sus temas, el manual del Plan Operativo Piloto tiene la siguiente estructura (NAMA Ganadería, 2013):

- a) Antecedentes.
- b) Procedimientos para la elaboración de los Planes de Finca.
- c) Indicadores y los procedimientos para su estimación.
- d) Descripción del procedimiento para la estimación del indicador: balance de gases de efecto invernadero (GEI) de la finca.
- e) Cálculo del indicador de eficiencia Productiva-Ambiental.

El Plan de Finca es el documento que describe modela acciones concretas, tangibles y cuantificables que guían encaminan las tareas relacionadas con la producción agraria a los objetivos, metas y actividades definidas por el Plan Operativo Piloto. Este documento está diseñado para ser utilizado por el productor, usualmente una familia con el apoyo del técnico asignado.

Este Plan es una descripción de las actividades relevantes en la finca a mediano y largo plazo, con la intención de dar solución a limitaciones presentes e impulsar la adaptación a las nuevas condiciones que ofrece el entorno, para una finca más rentable y sostenible. Con lo anterior en mente, el Plan indica de manera sencilla la forma de administrar los recursos de la finca.

El Plan tiene 6 componentes.

Componente 1: Información general de la finca. La finca, el productor y su familia se identifican y caracterizan en este componente.

Componente 2: La visión y misión de la familia. Las aspiraciones del productor o de la productora con respecto a su finca se describen en esta sección. Se consigna las metas que se quieren lograr y el plazo, con las tecnologías promovidas por el Plan Piloto, haciendo uso de las oportunidades del entorno. Esta visión provee guía y motivación encaminadas a realizar los cambios que se desean en la finca.

Componente 3: La situación actual de la finca. Se establecen las condiciones iniciales de la unidad productiva, señalándolas en un documento. Existen diferentes abordajes para este componente. Puede utilizarse desde material muy sencillo, como la versión del CATIE, con mapas dibujados a mano por los productores, hasta otros en los cuales el técnico se apoya en herramientas tecnológicas como imágenes satelitales QGIS® o Google Earth®.

Componente 4: La situación deseada de la finca. Partiendo de la visión del productor, las limitaciones y posibles soluciones, las oportunidades que presenta la finca y su entorno, así mismo se proponen las acciones a realizar en el período establecido, que según el plan es de dos a cinco años. La meta es definir acciones que al ejecutarse generen la finca que corresponde a su visión. El material de este componente está orientado a las ayudas visuales.

Componente 5: Las acciones que se deben seguir para alcanzar la finca deseada. Se describen las actividades o inversiones a realizar para conseguir los cambios necesarios. Se debe utilizar lenguaje directo y conciso. Las tecnologías que se promueven son muy importantes en esta etapa. El productor debe decidir los puntos siguientes:

- ¿Qué hacer?
- ¿Cuándo hacerlo?
- ¿Con qué recursos hacerlo?
- ¿Cuál es el costo?
- ¿Qué debe hacer cada participante en el plan?
- ¿Cómo se va a ejecutar?

Componente 6: El monitoreo y ajuste del plan. Con el plan ya establecido, la perspectiva es que el productor lo ejecute. Se espera que se evalúen periódicamente los avances, midiendo y calificando cuánto se ha realizado, las dificultades presentadas, necesidades que requieran intervención del técnico y/o instituciones, además de situaciones inesperadas.

La evaluación de Las estrategias implementadas en el Plan de Finca se realiza de tres maneras:

- a) Desde el escenario de línea base, en este enfoque no hay intervención.
- b) El escenario de mejora esperada con las propuestas, donde se esperan resultados con base en las tecnologías NAMA sugeridas.
- c) En el escenario real. Aquí se registran resultados de la actividad productiva de la finca (CATIE 2010).

El plan de finca no es intrínsecamente una garantía de éxito. Para lograr su correcto funcionamiento, se requiere seguimiento del personal técnico y un alto compromiso del productor, además de una comprensión realista de las condiciones de la finca y sus posibilidades.

Para las fincas del piloto de lechería se contará con un sistema de identificación de los animales, y un programa sanitario y de reproducción. A cargo del técnico, que será el encargado de gestionar este soporte en la finca. Los variados aspectos productivos, reproductivos y sanitarios se recogerán en

registros físicos para uso futuro en el programa VAMPP, para lograr un control efectivo.

Dicha información se registrará en los libros de registro físicos y luego se migrará al programa VAMPP (Herramienta diseñada para la administración de hatos bovinos) para poder hacer el control efectivo de los aspectos sanitarios, productivos y reproductivos. La información de los costos será registrada con el programa ABM.

En cuanto al manejo de costos, se cuenta con el programa ABM (Herramienta que posibilita la captura de datos de compra de insumos y venta de productos, asientos contables de insumos biológicos, o sea los animales, mediante una interfaz por desarrollar con el sistema VAMPP) para recolectar los datos. Para ambos sistemas, existe capacitación para los técnicos si se necesita (CATIE, 2010).

III. MARCO METODOLÓGICO

Área de estudio

Ubicación geográfica

Las fincas caracterizadas para parametrizar el modelo de simulación se encuentran en el distrito Tilarán, Cantón de Tilarán, provincia de Guanacaste. Específicamente, estas fincas conforman un asentamiento del INDER, llamado Asentamiento La Poma. Este se ubica a unos 3,4 km al sureste de Tilarán en carretera pavimentada, con latitud 0269164 y longitud 0432405, con una altitud de 679 msnm. Tiene dos frentes de calle pública, el primero frente a carretera pavimentada en el lindero oeste y el segundo frente a calle de lastre transitable en el lindero sur (Vargas 2015).

Condiciones climáticas y servicios básicos del asentamiento La Poma

La precipitación anual promedio oscila entre 1500 y 2000 mm, siendo los meses de febrero y marzo más secos y junio y agosto más lluviosos. Así mismo, los rangos de temperatura oscilan entre 15 y 17,5 °C hasta un máximo de 22°C y vientos que pueden alcanzar los 80 km/h (IMN 2014).

La finca cuenta con acceso a los servicios básicos de electricidad y transporte público. Cuenta también con fuentes de agua propias que pueden ser captadas de nacientes naturales y abastecidas por gravedad hasta almacenarse para luego por medio de bombeo distribuirse en la finca. La facilidad de contar con estos servicios representa una ventaja para el uso de tecnología agropecuaria que

requiere electricidad, como por ejemplo los cercos eléctricos. Asimismo, facilita el uso de motores para la distribución y almacenamiento de agua.

Selección del caso de estudio

Asentamiento La Poma

El asentamiento Finca La Poma, adquirido por INDER, posee un área total de 126 hectáreas (ha). La compra fue aprobada mediante el acuerdo de Junta Directiva del Instituto de Desarrollo Rural (INDER) en el artículo N° 6 de la sesión ordinaria 035-2013 celebrada el 18 de noviembre del año 2013. Este terreno se adquirió con la finalidad de proporcionarle cinco hectáreas a cada familia declarada elegible, para promover el desarrollo rural y mejorar la calidad de vida de las familias beneficiadas (Vargas 2015).

Esta propiedad presenta características adecuadas para el desarrollo de la actividad lechera, debido que en su mayoría su relieve es ondulado y se encuentra con gramíneas como Brizantha (*Brachiaria brizantha*), entre ellas y Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*), que son aptas para el pastoreo rotacional debido a su crecimiento rápido y valor nutritivo alto. Además, la finca presenta condiciones climáticas edáficas y tecnológicas características de los sistemas lecheros. Estas características fueron la causa de que las fincas del asentamiento fueron seleccionadas para parametrizar el modelo multi-agente. Por eso, la estrategia de muestreo usada en esta parte del estudio es no probabilística por conveniencia, como lo demuestra. En consecuencia, los datos obtenidos no se pueden considerar como representativos de todos los sistemas lecheros del cantón de Tilarán u otras zonas de altura de Costa Rica.

Procedimiento metodológico

Diagnóstico tecnológico de los sistemas de producción de leche en crecimiento

Con la finalidad de mejorar la comprensión de la problemática de adaptación al cambio climático de los sistemas de producción lecheros en crecimiento de la población de estudio de esta investigación, se realizaron una serie de acciones con la participación de los productores. En primer lugar, en noviembre de 2017 se llevó a cabo un taller con productores del Asentamiento La Poma para explicar el desarrollo de esta investigación, el desarrollo del proyecto de la Universidad Nacional: “Facilitando la implementación de tecnologías de producción agropecuaria sostenible en fincas de pequeños productores ganaderos del cantón de Nicoya, Costa Rica como estrategia para la adaptación a la sequía y el cambio climático (PRO-RBA)”. Como resultado de este taller se obtuvo el consentimiento de los productores para apoyar el desarrollo de este trabajo.

A continuación, se diseñó e implementó una herramienta de diagnóstico de finca por medio de una encuesta administrada en papel. En esta sección del estudio, se utilizó como estrategia el muestreo un censo, es decir, se encuestó al total de productores del asentamiento La Poma ($n = 21$ productores). Para esta selección se utilizaron criterios de homogeneidad en las fincas e interés de los propietarios y se les brindó inducción previa. Sin embargo, solo se encuestaron a veinte productores, porque la finca faltante tiene una condición de propiedad especial, ya que es manejada por tres dueños.

La encuesta tiene cinco secciones: información general, estructura de hato, caracterización productiva, mercado, infraestructura de producción y sistema productivo. Las encuestas fueron efectuadas durante el primer trimestre del año

2018. Esto con el fin de determinar la línea base de los sistemas productivos examinados.

Una vez aplicados los diagnósticos se efectuó la tabulación de la información y análisis con el fin de valorar los indicadores productivos, reproductivos, genética, adopción de tecnologías NAMA, y estructura de hato. Esto se desarrolló utilizando a una hoja de Excel, donde además se utilizaron funciones de este software para obtener estadística descriptiva (medias y rangos principalmente).

Finalmente, a partir de los datos así obtenidos se realizó el análisis con la finalidad de obtener conclusiones confiables que puedan servir de guía en el proceso de adopción de tecnologías NAMA aplicables a fincas productoras lecheras similares a las modeladas en esta propuesta. Además, se facilitó la visualización de la estructura del modelo propuesto, sus componentes y las relaciones entre ellos con un diagrama descriptivo elaborado a partir los datos que estas actividades proporcionaron.

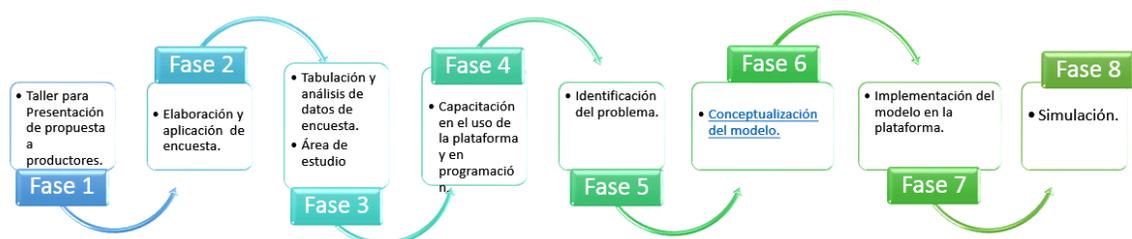


Figura 1. Proceso metodológico seguido para el desarrollo del modelo MANA-PRV.

Elaboración propia.

Necesidad de un modelo

La finalidad última de un modelo es comprender y enunciar la totalidad de los requisitos y conocimientos necesarios para que todos participantes en el desarrollo estén en capacidad de comprenderlos sin discrepancias o dudas entre sí. (Booch, Jacobson y Rumbaugh, 2000)

Para lograr la comprensión de las dinámicas implicadas en el proyecto de implementar la actual propuesta de adaptación al cambio climático para los sistemas de producción lechera de La Poma, ha sido evidente la necesidad de desarrollar un modelo, partiendo de un diseño conceptual sólido y desarrollando una herramienta de visualización y planificación que resulte práctica de aplicar y que genere confianza en los productores.

Siguiendo los criterios de Booch, Jacobson y Rumbaugh (2000) tenemos que un modelo es una representación del problema que se está tratando. En esta representación, se tiene una perspectiva que muestra los aspectos importantes de lo que se modela e ignora u omite aspectos que no son de relevancia.

En el caso del modelo NAMA-PRV, el establecimiento de un modelo adecuadamente desarrollado que responda a las necesidades de validez estrategias de adaptación al cambio climático para los productores de La Poma permite:

- Explorar diversas arquitecturas y soluciones de diseño de forma más fácil, permitiendo lograr una solución correcta antes iniciar la elaboración del modelo detallado.

- Permite que los productos (y también los técnicos) cuenten con una solución de software, una herramienta para la toma de decisiones, sin preocuparse por detalles internos de los procesos.
- Encontrar información resultante de las relaciones entre los agentes involucrados en la simulación.
- Explorar múltiples soluciones de manera económica. Los riesgos y ventajas de las posibles alternativas suelen estar ocultas en interacciones complicadas de los actores con diversos parámetros. No hay forma evidente de previsualizar los resultados de combinar múltiples factores. El poder simular muchos posibles escenarios diferentes sin realizar físicamente las diferentes pruebas ahorra dinero, recursos y tiempo.
- NAMA-PRV puede mostrar el impacto potencial de cambios en la estructura y organización de los apartos de La Poma sin que se tenga necesidad de realizarlos físicamente. Puede mostrar como cambiar los parámetros del uso de los apartos para reducir efectos adversos y mejorar la adaptación al cambio climático.
- El modelo, al estar finalmente plasmado en un sistema informático, esto es un sistema de software, logra tratar la complejidad de la realidad y proyectarla a un nivel comprensible a los usuarios (productores de la poma y técnicos que les dan asistencia). De esta manera, el productor puede inferir pautas a seguir para aumentar el rendimiento de los apartos de La Poma, sin preocuparse de detalles como procesos físicos complejos (velocidad de crecimiento del pasto, consumo de energía del ganado, etc.) que son calculados por el sistema usando modelos físicos

Es claro entonces que, para lograr la génesis del modelo a desarrollar, y que este responda a las expectativas tanto de los modeladores como de los usuarios, que son los productores de La Poma y potencialmente otros productores, se debieron emplear herramientas adecuadas para la conceptualización

y el desarrollo del modelo NAMA-PRV. Estas herramientas son descritas a continuación.

Lenguaje Unificado de Modelado (UML)

UML (del inglés, Unified Modeling Language), es un lenguaje de modelación visual que permite especificar, construir, visualizar y documentar modelos, tanto destinados a sistemas informáticos como para su uso en otros muchos campos. Posibilita el registro de conocimiento y decisiones sobre los sistemas a desarrollarse. Permite plasmar información tanto sobre el comportamiento dinámico como de la estructura estática de un sistema. Está pensado para ser particularmente útil en desarrollo orientado a objetos. El objetivo primordial del UML es constituir un lenguaje de modelado de propósito general, disponible para todos los modeladores de diversos campos y muy ampliamente aceptados y usado. (Booch, Jacobson y Rumbaugh, 2000).

Lenguaje de programación Smalltalk

El lenguaje de programación Smalltalk, desarrollado en los años 70, es un lenguaje orientado a objetos, poderoso, expresivo y adaptable que tiene como finalidad ser una herramienta para potenciar la creatividad de las personas. Su principal campo de acción han sido la educación y la investigación. Smalltalk es en si mismo toda una filosofía de uso del potencial de las computadoras, pensado para flexibilizar el desarrollo creativo de ideas no convencionales. Programar en este lenguaje en un proceso muy diferente del que se efectúa con los lenguajes de programación más tradicionales. (Gómez, 2007).

Un sistema Smalltalk generalmente requiere de un *entorno de desarrollo*. En este caso se utiliza *VisualWorks*.

Entorno de desarrollo VisualWorks

Un entorno de desarrollo integrado es un sistema o aplicación informático que brinda servicios que facilitan a los programadores el desarrollo de sus aplicaciones. Estos servicios normalmente incluyen edición de texto, depuración y herramientas de automatización. VisualWorks es un entorno de desarrollo para Smalltalks. Es completamente orientado a objetos y permite crear interfaces gráficas de usuarios con agilidad. (VisualWorks User's Guide, 1995).

Plataforma de modelado multi-agente CORMAS (COMmon-pool Resources and Multi-Agent Systems)

CORMAS el principal recurso utilizado para la ejecución de este proyecto. Es un entorno de programación para orientado a los sistemas multi-agentes. Se utiliza para la creación de modelos de simulación relacionados con la explotación de recursos naturales. Esta plataforma de simulación está basada en el ambiente de programación VisualWorks y permite el desarrollo de aplicaciones en el lenguaje Smalltalks. Provee de clases genéricas que pueden ser modificadas y adaptadas por los usuarios para programar sus propios modelos.

CORMAS organiza el proceso de modelado en 3 etapas:

- La definición de las entidades del modelo, o agentes, que interaccionan entre sí por comunicación directa o por el hecho de compartir un mismo ambiente. Estos agentes pueden ser espaciales, sociales o pasivos.

- Control de la evolución global del modelo, controlando la dinámica de los diferentes eventos con el paso del tiempo.
- La definición de los puntos de vista o de observación del modelo. Esto permite el uso de diversas herramientas que permiten la interpretación de los resultados producidos por el modelo.

(CIRAD, 2001)

Desarrollo del modelo multi-agente: NAMA-PRV

Los Sistemas Multi-Agente (SMA) constituyen herramientas apropiadas cuando es necesario representar y comprender interacciones entre varios actores (agentes). En estos casos, el comportamiento de cada componente y los recursos que estos consumen o producen pueden ser demasiado complejos de representar debido a la multiplicidad y heterogeneidad de actores y su interacción en el tiempo. Además, la solución por medios algorítmicos tradicionales no resulta posible o recomendable, dada la complejidad de los procesos e interacciones a representar y los conocimientos matemáticos y técnicos que se requeriría para lograr un modelo que responda a la realidad, o el costo computacional de los mismos. Existen métodos para realizar simulaciones de escenarios futuros uniendo una realidad modelada y el diseño de un Sistema Multi-Agente (Guerra, Iraola y Sanchez, 2010).

Según manifiesta (Fallot, 2013), en la metodología PARDI, mediante la modelación participativa, es posible tomar un caso local de manejo de recursos naturales y sintetizarlo, completándolo para construir escenarios y elaborar estrategias de adaptación al cambio climático focalizado en la toma de decisiones.

Los sistemas socio-ecológicos son aptos para ser tratados mediante estas técnicas de modelación. Ejemplos pueden ser entidades de paisaje donde se

identifican problemas en la gestión de recursos naturales que deban ser compartidos, o la problemática de disponibilidad y calidad de una cuenca como recurso hídrico sometida al cambio climático (Fallot, 2013)

Un ejemplo del uso de Sistemas Multi-Agente (SMA) es el modelo propagación del virus de gripe A (N1H1) (Guerra, Iraola y Sanchez 2010). Supongamos que un país tiene un porcentaje de su población sana y otro infectada por la gripe A. Se determinó que el virus se propaga dentro de la población por el contacto directo con una persona enferma y que la única forma que una persona sana no se contagie es porque se suministró (consumió) una vacuna trivalente (las cuales son agotables). Cabe destacar que el objetivo que persiguen las personas sanas es evitar el contagio y las personas enfermas es curarse, para que la enfermedad no derive en una pandemia (Guerra, Iraola y Sánchez, 2010).

Modelada como un SMA, la población sana de la situación anterior representa a un tipo de agente, mientras que la población enferma representara otro. Las vacunas representan a recursos cuya disponibilidad se ve afectada por la cantidad de personas a las que se les suministra y el país representa el ambiente en donde las personas (agentes) viven e interactúan. En la situación del ejemplo, el SMA está compuesto por toda la población (sana y enferma) del país el cual proporciona las condiciones necesarias para que las personas interactúen persiguiendo cada una de ellas su objetivo (curarse o evitar la enfermedad). Mediante un SMA se podría realizar el seguimiento de la propagación del virus (por ejemplo porcentaje de personas contagiadas), así como el monitoreo de los diferentes factores (por ej. Número de vacunas disponibles) que afectan a la población (Guerra, Iraola y Sánchez, 2010).

En el procedimiento de acuerdo con (Fallot, 2013), los objetivos de la modelación participativa incluyen:

- a) Hacer posible la concientización de la problemática sobre los recursos ambientales, identificando variados puntos de vista, para mejorar el conocimiento que tienen los diversos actores sobre el sistema socio-ecológico.
- b) Mejorar el entendimiento del sistema socio-ecológico y de las diversas dinámicas que accionan conjuntamente en múltiples situaciones.
- c) Identificar colectivamente soluciones aceptables, previendo de antemano el alcance de las decisiones y su impacto en el modelo, enriqueciendo así el proceso de decisión.

Además, (Fallot, 2013) manifiesta que apoyar a los participantes en la descripción de su entorno, facilita a que:

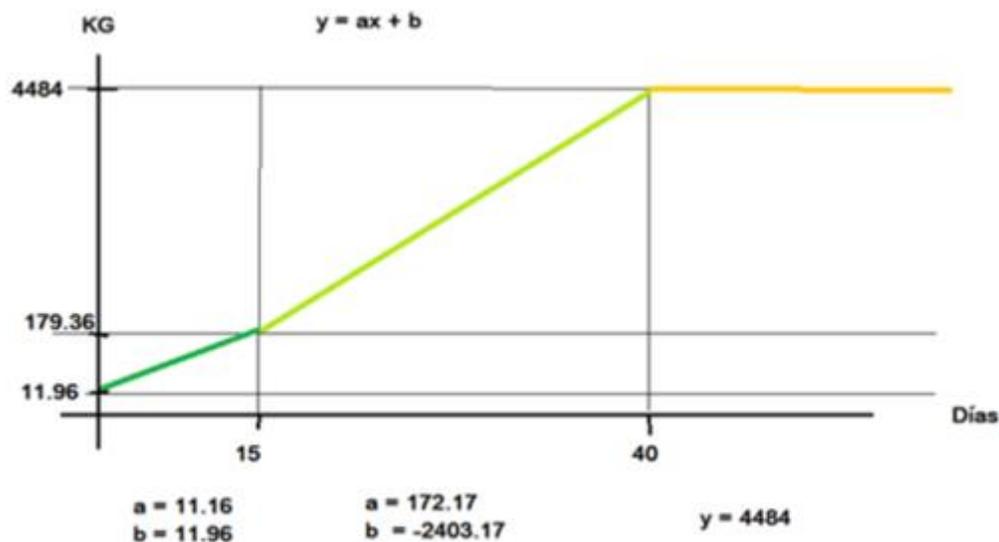
- a) Planifiquen el planteamiento del uso y el manejo de sus recursos.
- b) Sean explícitos sobre sus objetivos.
- c) Tengan claro la dimensión espacial de sus actividades.
- d) Se proyecten en el futuro y estimulen su imaginación al respecto.

A partir de representaciones individuales, el propósito de ayudar a compartir un mismo entorno apunta a:

- a) Compartir representaciones de la estructura y de las dinámicas del sitio.
- b) Llamar la atención de los actores sobre las interacciones.
- c) Entender las perspectivas de los demás actores.
- d) Negociar.
- e) Permitir experimentar sin riesgos reales.
- f) Colaborar sobre acciones futuras.

Teniendo en cuenta la información generada en el diagnóstico, el conocimiento técnico adquirido en la formación profesional y la experiencia técnica de los autores se utilizaron los conceptos de la modelación multi-agente antes mencionados para desarrollar un simulador de un sistema de producción lechera en crecimiento. Inicialmente, se partió de un proceso de recopilación de información secundaria, especialmente para obtener datos sobre el impacto de las tecnologías NAMAs en los sistemas productivos. Sin embargo, la disponibilidad de esta información permanece limitada, ya que el programa NAMA ganadería está desarrollando experimentos en finca para conocer los impactos de las tecnologías. Considerando la disponibilidad de información entonces se seleccionó una tecnología para diseñar un modelo conceptual y luego implementar una prueba piloto con la modelación: pastoreo rotacional.

El modelo multi-agente, responde a las características del Asentamiento La Poma. En la creación del modelo propuesto, en aras del fortalecimiento del diseño, se utilizaron también resultados obtenidos por observación o experiencia de otras investigaciones en el campo agrario. Como ejemplo de esto, la estimación del valor de la materia seca producida en promedio por hectárea de terreno en condiciones similares a las del Asentamiento La Poma (Gráfico 1), en la cual fue utilizada en la estimación de la capacidad de carga del terreno, se basa en la nota técnica de los investigadores Villalobos y Arce (2013).



Y = Kg de MS/ha

Gráfico 1. Ecuación lineal de producción de materia seca del pasto Estrella Africana (*Cynodon nlemfuensis*) utilizada para parametrizar el modelo multi-agente (Villalobos y Arce, 2013)

El modelo multi-agente NAMA-PRV fue desarrollado por los estudiantes autores de este documento. Inicialmente, los estudiantes participaron de un proceso de capacitación que incluyó un curso sobre modelación multi-agente facilitado por CIRAD y la Facultad de ciencias Agroalimentarias de la UCR. Posteriormente, guiados por el tutor principal y el lector, se desarrollaron tutoriales de programación en el lenguaje Smalltalk y tutoriales de programación y simulación en CORMAS (<http://cormas.cirad.fr>). Como paso final, en un proceso progresivo de talleres internos entre los estudiantes, el tutor, el lector y un técnico en programación, se desarrolló el modelo conceptual del sistema ganadero, así como la priorización de los principales métodos y comportamientos a considerar en la simulación.

Objetivo del modelo NAMA-PRV

La meta de este modelo es producir una representación simplificada de un sistema de pastoreo rotacional en una finca lechera modelo. El modelo resultante posibilitara comparar y analizar diversas configuraciones sistemas de rotación (PRV), una de las estrategias NAMAs ganadería, para determinar la disponibilidad de consumo de materia seca diaria requerida por los animales para su producción ya sea carne o leche. Este modelo tiene como finalidad ser una herramienta para el cumplimiento del objetivo general y los objetivos específicos de esta propuesta. Además, se ha probado su efectividad para favorecer el aprendizaje de técnicos pecuarios.

Al ser producto de un proceso de modelación participativa entre técnicos, el modelo presentado ha sido diseñado para:

- a) Mejorar el entendimiento de los productores sobre su sistema productivo y permitir la concientización sobre el uso de los recursos naturales necesarios en el proceso.
- b) Mejorar la comprensión de las interacciones presentes en el sistema de acuerdo con condiciones variables.
- c) Mejorar los procesos de toma de decisiones de manejo de finca, al permitir descubrir soluciones aceptables de manera colectiva y prever sus impactos a través de la simulación.

Lo anterior concuerda con las características que se buscan con la modelación participativa según Fallot (2013), que ya se han mencionado.

Descripción del modelo

El modelo NAMA-PRV (NAMA – Pastoreo Rotacional Voisin) fue creado en el ambiente de simulación de código abierto CORMAS (COMmon-pool Resources and Multi-Agent Systems), del CIRAD (Bommel, 2019). CORMAS es una plataforma de modelación multi-agente dedicada al manejo de los recursos renovables. Está desarrollado en el lenguaje de programación orientado a objetos SmallTalk, usando el software de desarrollo VisualWorks. Al ser un sistema multi agente (SMA), este ambiente de programación permite la simulación de dinámicas naturales, económicas y sociales, que subyacen en la interacción de agentes o entidades, de manera natural y sin que los desarrolladores requieran conocimientos avanzados de matemática, física, o recurrir a técnicas especializadas de programación gráfica. (Bommel, 2019).

Los agentes o entidades constituyen prototipos o "clases" de objetos que reúnen las características o propiedades de los objetos reales a representar, además de sus comportamientos y sus relaciones con otras entidades. Estas clases pueden instanciarse para producir objetos (llamados instancias de estas clases). Así, se produce la cantidad de elementos de cada clase que se requiera para las simulaciones.

Los agentes o entidades básicas de este modelo, que son el resultado de una simplificación del sistema productivo de una finca en La Poma, se detallan en la Tabla 4. Cabe apuntar que inicialmente, se consultaron modelos existentes que son ejemplos de modelos multi-agentes pedagógicos como ECEC (Bommel et al., 2012) y SEQUIA (Bommel et al., 2011) para poder comprender los componentes de los modelos multi-agentes y los diferentes elementos que pueden ser modelados en sistemas ganaderos.

Tabla 4 Entidades consideradas en la modelación multi-agente del sistema de pastoreo rotacional en una finca lechera modelo del cantón de Tilarán, Guanacaste, Costa Rica

Entidad	Descripción
Pasto	<p>Es la unidad básica espacial de 1 m² que produce biomasa. Sus principales características son la cantidad de materia seca contenida por unidad de área, así como las reglas de crecimiento en función del tiempo y su disponibilidad de ser ocupada y consumida por la entidad denominada Vaca. Las características de crecimiento del pasto corresponden a la variedad Estrella Africana (<i>Cynodon nlemfuensis</i>) como se indica en la Fig. 1. Estas características de crecimiento se calculan con la función lineal mostrada en la figura, que a su vez es una simplificación, para efectos del modelo completamente funcional, de la función logística que describe el crecimiento del este pasto en el mundo real.</p>
Aparto	<p>Es la organización en secciones en que se divide la finca. Contiene a las entidades denominadas Pasto, y delimita el área accesible para ser consumida por las entidades Vaca. Los principales cálculos y decisiones del agente que representa la entidad Productor se efectúan sobre la información contenida en esta entidad. El conjunto de todas las entidades Aparto, sus características, así como los subconjuntos en que se divida, son un parámetro importante en la evolución de la simulación</p>
Vaca	<p>En esta entidad se definen funciones de alimentación, consumo energético, desplazamiento y aumento de peso corporal, como indicador de producción, se efectúan sobre la población de instancias de esta entidad. Tiene inicialmente tiene un peso de 450 Kg que</p>

corresponde a una unidad animal.

Productor La entidad Productor es la representación en la simulación del propietario de la parcela. Decisiones como traslado de ganado entre apartos, y cantidad de apartos, y que corresponden a los parámetros que se quieren probar durante la evolución de la simulación, se establecen por medio de esta entidad. Esta entidad es única.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Diagrama UML de clase que representa la estructura del modelo para analizar la tecnología de pastoreo rotacional en una finca modelo del cantón de Tilarán, Guanacaste, Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo conceptual puede observarse en el diagrama de clase (Figura 2). Este diagrama UML (Unified Modeling Language) presenta la estructura general del modelo. El modelo cuenta con un agente "Productor" que observa y maneja todo el sistema. Las acciones de manejo del Productor en este modelo han sido restringidas exclusivamente a suplementar, fertilizar, ordeñar, definir apartos, mover el hato y administrar. Estas acciones representan actividades y

características del mundo real, donde los propietarios o administradores definen las condiciones y valores normales o iniciales del sistema, y siguen cursos de acción que determinan cambios en el comportamiento de este sistema tendientes a lograr resultados deseables.

Estas actividades son conocidas formalmente como métodos u operaciones. El Productor administra una Finca, la cual tiene tres atributos: área, número de apartos y área de apartos. Estos atributos pueden ser especificados en las condiciones iniciales de la simulación; o cambiar conforme las decisiones del Productor. La Finca es habitada por un Hato, el cual tiene un solo atributo: número de cabezas de ganado. El Hato también es administrado por el Productor. La Finca se compone (agregación) de Aparto que tienen un solo atributo: disponibilidad (de pasto). Pero también tiene un método llamado área. A su vez los apartos están compuestos por Pasto. La clase Pasto cuenta con cuatro atributos: materia Seca (kg/m^2), área (1 m^2), r (tasa de crecimiento) y k (capacidad de carga); y un método llamado crecimiento Diario. El Pasto es afectado por el Ambiente y cuenta con tres atributos: temperatura, humedad y estación. La clase Ambiente también afecta a la clase Vaca que es el segundo agente del modelo. La clase Vaca cuenta con tres atributos: peso, consumo y tasa catabólica; pero también con dos métodos moverse y comer. Finalmente, una o más entidades Vaca se agregan para conformar un grupo, que representa un grupo de vacas localizadas en un Aparto y que se alimenta de su biomasa.

Funcionamiento del modelo

El modelo NAMA-PRV permite hacer simulaciones basadas en la disponibilidad de materia seca por ciclo de pastoreo de una determinada área de finca. Para este caso de estudio, la finca modelo es de 4 ha dividida en 4, 20, o 40 apartos, este está ligado al consumo de los animales con respecto al peso vivo

que puede variar entre el 2.2, 2.5 y 3.0 %. El aprovechamiento de la materia seca disponible puede variar entre un 35, 40, y 45 %. Para este caso de estudio, se toma la más baja 35%. Estas variables se utilizan para hacer diferentes simulaciones, además se toma el valor inicial de 450kg equivalente al peso de una unidad animal.

Supuestos del modelo NAMA-PRV

- Los aspectos modelados son los más relevantes para la comprensión del sistema.
- El tiempo en la simulación consiste en unidades discretas, invariables y aunque arbitrarias, pueden ser identificadas como un día.
- Una condición inicial de la simulación es la disponibilidad de pasto suficiente para el consumo del ganado, acorde a lo esperable en una situación real en la zona a modelar.
- Cada cabeza de ganado de la simulación corresponde a una unidad animal de 450 kg cada una.
- El número de unidades animales (cabezas de ganado) integrantes del hato permanece constante durante una simulación: no hay mortalidad, ni incremento de la población.
- El esfuerzo o consumo de energía por el traslado entre apartos no es significativo en esta versión del modelo.

- El crecimiento del pasto tiene límites y características definidas por un trabajo de investigación previo, que ha servido de referencia para la modelación del su comportamiento esperado, mediante fórmulas que lo describen (Villalobos y Arce 2013), cf. Fig. 1.
- Existe un factor de daño por pisoteo, estimado en un 10% del área de pastoreo.
- No se consideran factores externos que perturben el crecimiento del pasto o el ganado. Para efectos de esta simulación, los factores ambientales, temperatura, humedad o estacionalidad, se consideran adecuados e invariables.

Procedimiento de la simulación

La verificación del modelo multi-agente se efectuó por medio de sesiones de trabajo internas donde participaron los autores de este documento, ambos expertos técnicos en ganadería, un técnico en programación, y el lector de este estudio e investigador del CIRAD Pierre Bommel. En estas sesiones, se observaban los resultados de los indicadores del modelo y se revisaba la lógica de estos. Es decir, si el modelo produce comportamientos que los técnicos entienden y encuentran una explicación lógica, o si el modelo por lo contrario señala tendencias inesperadas. Considerando los resultados iniciales, se efectuaron cambios en la situación inicial de la modelación y otros componentes del modelo. En total se revisaron un total de seis versiones del modelo para obtener el resultado publicado en este documento.

Finalmente se decidió efectuar un análisis de 27 escenarios por simulaciones, para contrastar la tendencia de los indicadores y situaciones

iniciales de acuerdo con la Tabla 5. Los resultados de los indicadores fueron exportados a Excel para desarrollar gráficos lineales que permitieran explicar y contrastar los diferentes escenarios simulados. Los resultados de esta sección se describen en una narrativa respaldada con observaciones efectuadas en la literatura disponible sobre pastoreo rotacional y modelación multi-agente.

Tabla 5. Configuración de los escenarios utilizados en la simulación multi-agente del modelo NAMA-PRV.

Escenario	#animales	#apartos	m² aparto	consumo peso vivo %
E1A10Ap4C2,2	10	4	40000	2,0
E2A10Ap4C2,5	10	4	40000	2,5
E3A10Ap4C3	10	4	40000	3
E4A10Ap20C2,2	10	20	2000	2,0
E5A10Ap20C2,5	10	20	2000	2,5
E6A10Ap20C3	10	20	2000	3
E7A10Ap40C2,2	10	40	1000	2,0
E8A10Ap40C2,5	10	40	1000	2,5
E9A10Ap40C3	10	40	1000	3
E10A20Ap4C2,2	20	4	40000	2,0
E11A20Ap4C2,5	20	4	40000	2,5
E12A20Ap4C3	20	4	40000	3
E13A20Ap20C2,2	20	20	2000	2,0
E14A20Ap20C2,5	20	20	2000	2,5
E15A20Ap20C3	20	20	2000	3
E16A20Ap40C2,2	20	40	1000	2,0
E17A20Ap40C2,5	20	40	1000	2,5
E18A20Ap40C3	20	40	1000	3
E19A30Ap4C2,2	30	4	40000	2,0
E20A30Ap4C2,5	30	4	40000	2,5
E21A30Ap4C3	30	4	40000	3
E22A30Ap20C2,2	30	20	2000	2,0
E23A30Ap20C2,5	30	20	2000	2,5
E24A30Ap20C3	30	20	2000	3
E25A30Ap40C2,2	30	40	1000	2,0
E26A30Ap40C2,5	30	40	1000	2,5
E27A30Ap40C3	30	40	1000	3

La nomenclatura de los escenarios se compone de los siguientes prefijos seguidos de un valor de parámetro numérico:

E- Escenario

A- Número de animales

Ap- Número de apartos

C- Valor del consumo por animal por día en materia seca

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Diagnóstico de los sistemas de producción del Asentamiento La Poma 2018

Las 20 fincas consideradas en este estudio tienen la misma extensión: cinco ha. Sin embargo, el área efectiva de pastos es menor y presenta una media de 4,8 ha. Existe una vigésima primera parcela de tres hectáreas que no se incluyó por tener un régimen de propiedad colectivo.

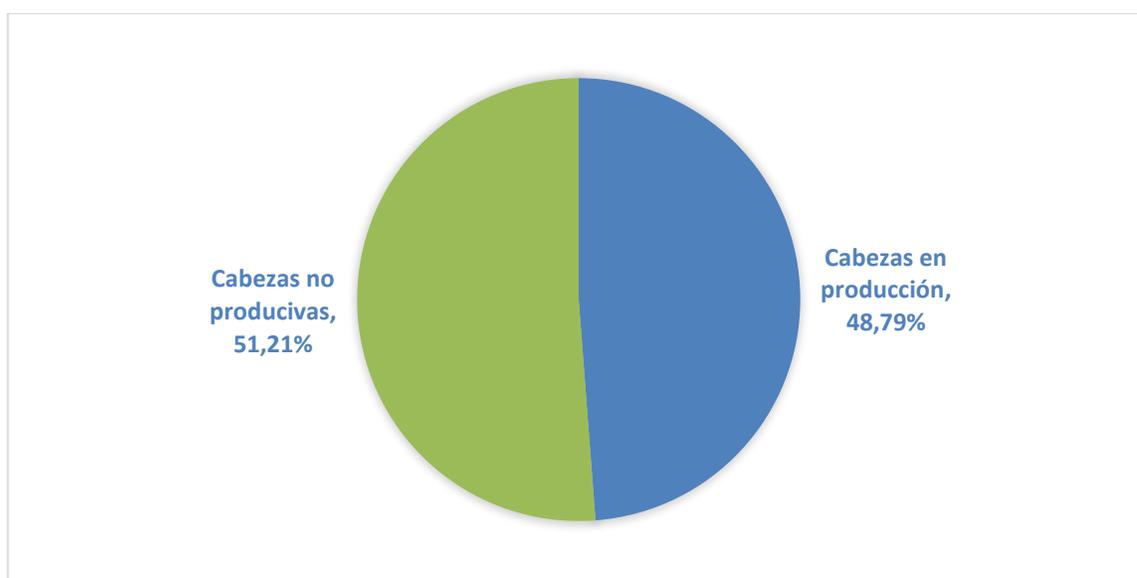


Gráfico 2. Porcentaje de productividad del hato del asentamiento La Poma.

Fuente: Elaboración propia.

La Poma contaba en 2019 con un total de 181 vacas en producción, lo cual representa un 48,79% del total del hato del asentamiento. Por finca el promedio de vacas productoras es de 8,75 cabezas con un rango que van de cero a 21 cabezas de ganado.

La producción total del asentamiento es de 2.239 kg/día, con un promedio por finca de 111,95 kg/día, en un rango de 0 a 300 kg/día. Solamente una finca no estaba produciendo, esto porque su propietario no cuenta con capacidad de inversión.

El tipo de pastura predominante es el Estrella Africana (*Cynodon nlemfuensis*), presente en un 86,1 ha del asentamiento. En muy pequeñas cantidades se encuentra *B. brizantha*.

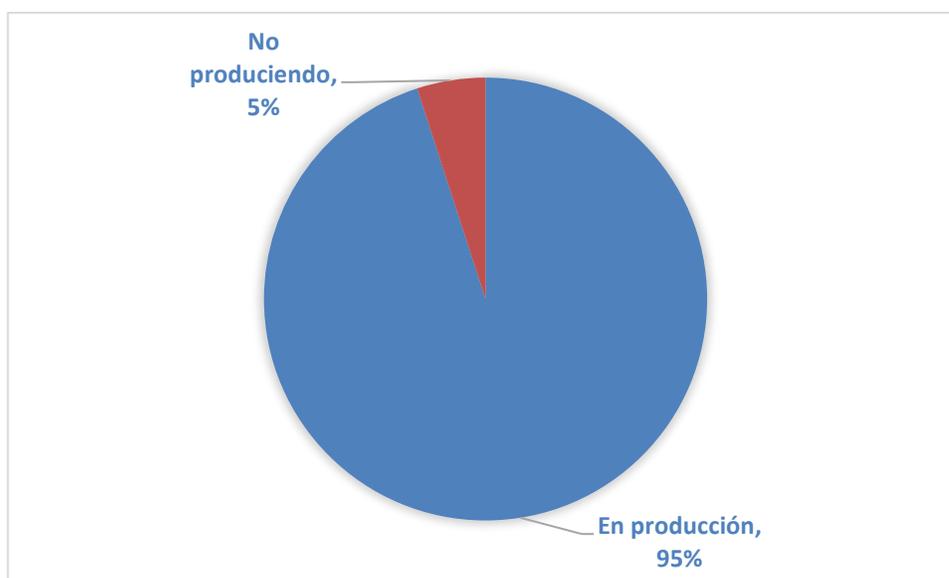


Gráfico 3. Estado de producción de las fincas del asentamiento La Poma.

Fuente: Elaboración propia.

Las fincas están divididas en promedio en 21 apartos, siendo los casos particulares de 1 a 56. Excepto por estos dos casos extremos, los productores utilizan rotación de un apto diario. Por otro lado, la totalidad de las ellas cuenta con agua de naciente.

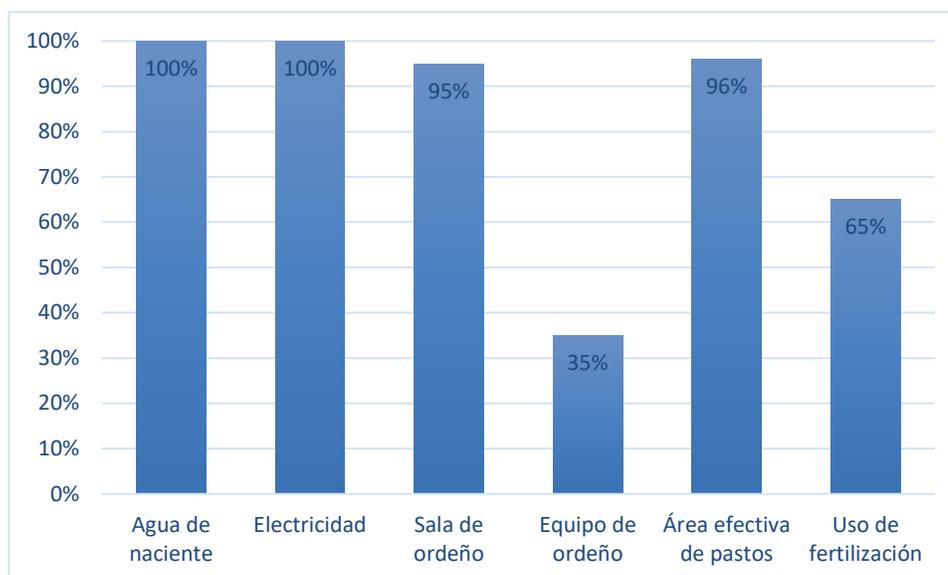


Gráfico 4. Caracterización de las fincas del asentamiento La Poma. Promedio de 20 fincas.

Fuente: Elaboración propia.

El 95% de las fincas (19 de 20) cuentan con sala de ordeño techada. El 35% (7 fincas) cuentan con equipo de ordeño. El 100% cuentan con electricidad.

En promedio cada productor comercializa 111,95 kilogramos de leche por día, para un total colectivo de 2.239 kg/día. No se comercializa queso. El 65% (13 productores) vende a queseros, mientras que el 20% (4 productores) vende a una planta procesadora de subproductos lácteos. El 50% (10) de los propietarios están afiliados a la empresa Sigma Alimentos.

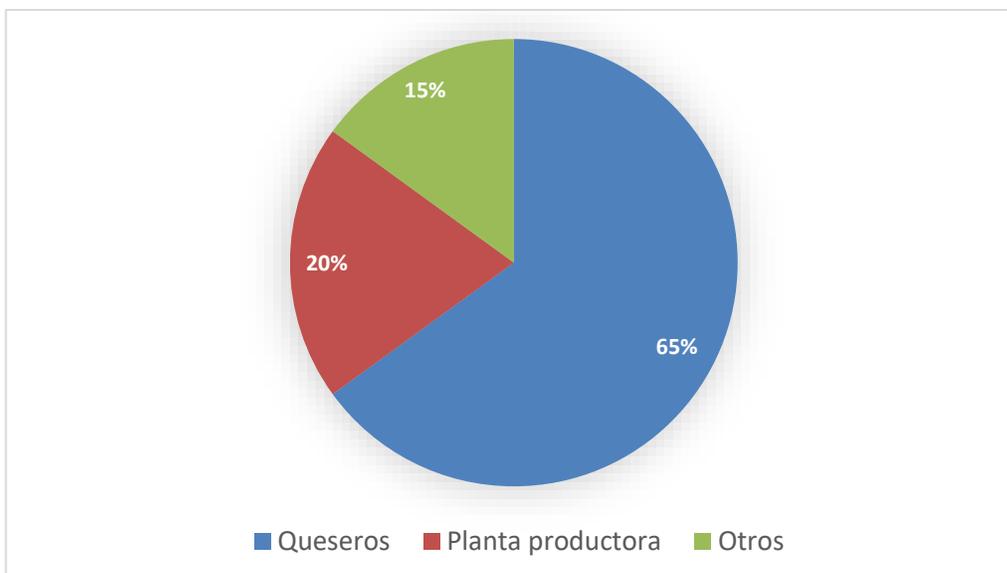


Gráfico 4. Comercialización de leche producida en las fincas del asentamiento La Poma.

Fuente: Elaboración propia

El 65% (13) de las parcelas se fertilizan con un promedio de 170.2 kg/mes para un total de 3.404 kg de fertilizante nitrogenados y formulas completas por mes aplicado en el asentamiento.

Simulaciones del Modelo multi-agente

Visualización del simulador

El modelo PRV_NAMA ha sido codificado en Smalltalk para para ser ejecutado en la plataforma de CORMAS (Figura 3).

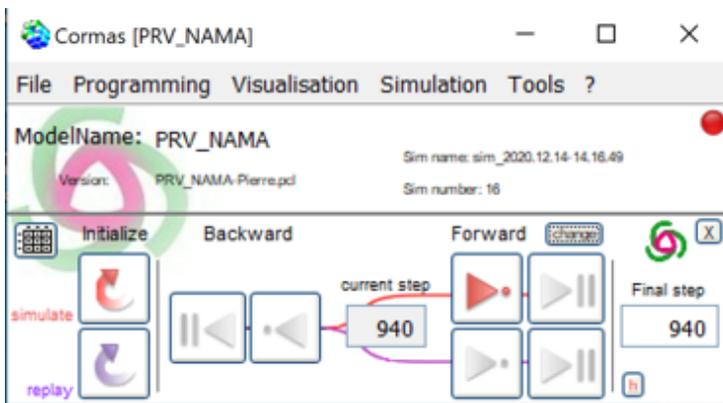


Figura 3: Interface principal de la plataforma CORMAS.

Fuente: Elaboración propia

Al final de la inicialización, se abre automáticamente una interfaz gráfica que muestra una grilla espacial que representa la finca, las vacas y la división del espacio en áreas de pastoreo (o apartos). El gradiente de color verde corresponde a la cantidad de biomasa en cada metro cuadrado, siendo los tonos más oscuros representativos de mayor concentración de biomasa.

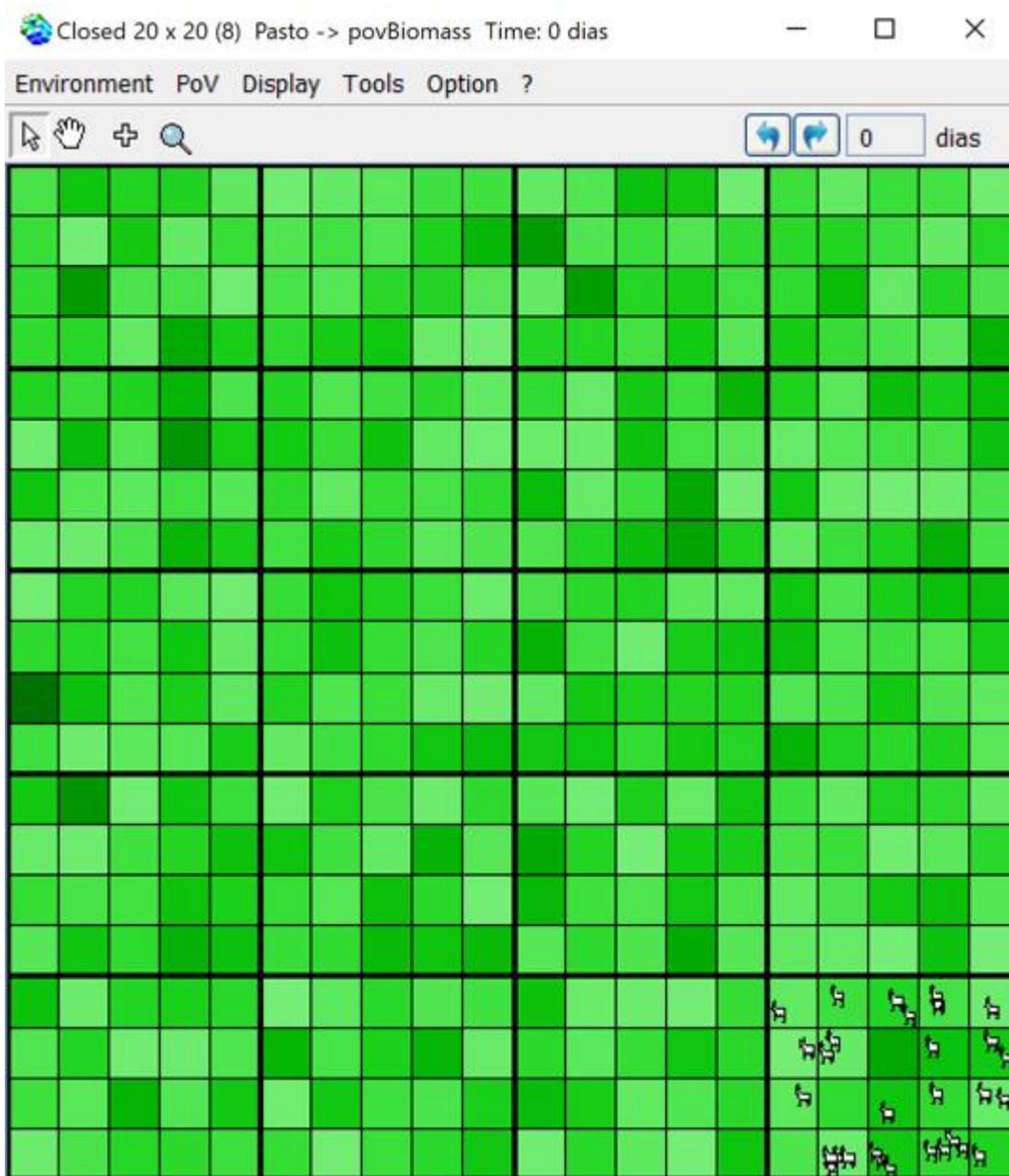


Figura 4. La grilla espacial de PRV_NAMA que representa la finca, sus vacas y la división del espacio en apartos.

Fuente: Elaboración propia.

En cada paso de tiempo (día), se ejecutan dos dinámicas: una corresponde al crecimiento de los pastos, la otra corresponde a las actividades de las vacas. Las vacas se mueven por las zonas con más hierba y luego consumen parte de ella, lo que no sólo cambia su propia masa corporal, sino que también reduce la

biomasa de hierba disponible para las demás. Estos mecanismos se reproducen todos los días. Al final de cada día, el agente de producción decide (o no) trasladar su hato a un aparcamiento con una biomasa más alta. Las siguientes figuras muestran la evolución del paisaje de la finca a lo largo de 10 pasos de tiempo, lo que nos permite ver esta doble dinámica.



Figura 5. Evolución de la finca durante 10 pasos de tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Estas simulaciones se realizan a lo largo de 5 años, lo que permite ver la evolución del paisaje originada por las interacciones simuladas.



Figura 6. Evolución de la finca durante 5 años.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, también se puede observar cómo los dos indicadores de interés para los productores evolucionan en el tiempo.

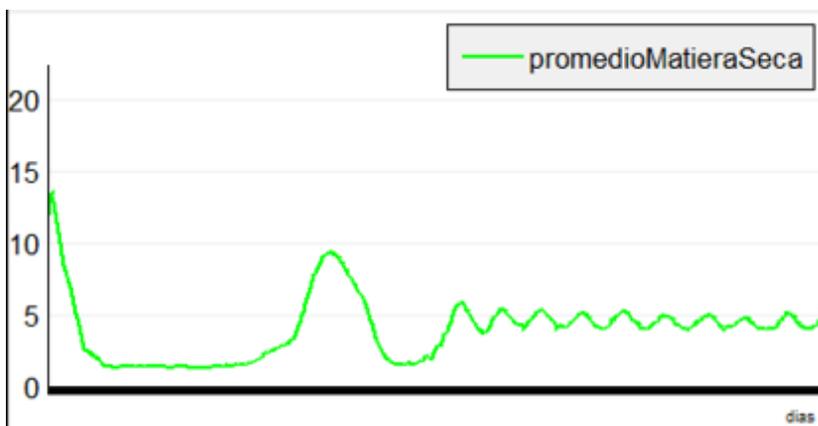


Gráfico 6: Evolución del promedio de MS a lo largo de una simulación de 830 días (2.3 años).

Fuente: Elaboración propia.

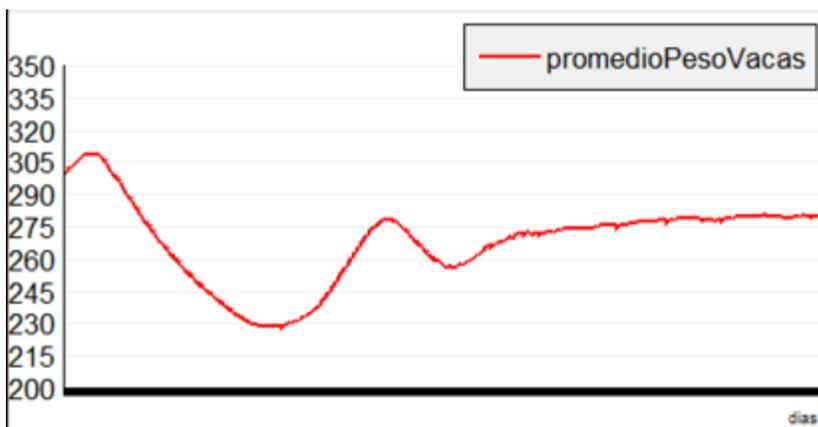


Gráfico 7: Evolución del promedio de peso por vaca a lo largo de una simulación de 2.3 años.

Fuente: Elaboración propia.

En general, una simulación es bastante caótica en las fases iniciales, con grandes fluctuaciones en los indicadores, hasta que los resultados de las interacciones se manifiestan, con lo que se alcanza un estado más estable.

Resultados de simulaciones

Los resultados de las simulaciones del modelo NAMA-PRV se expresan en unidades de biomasa calculadas por la proporción KgMS/día/100m², donde MS es materia seca.

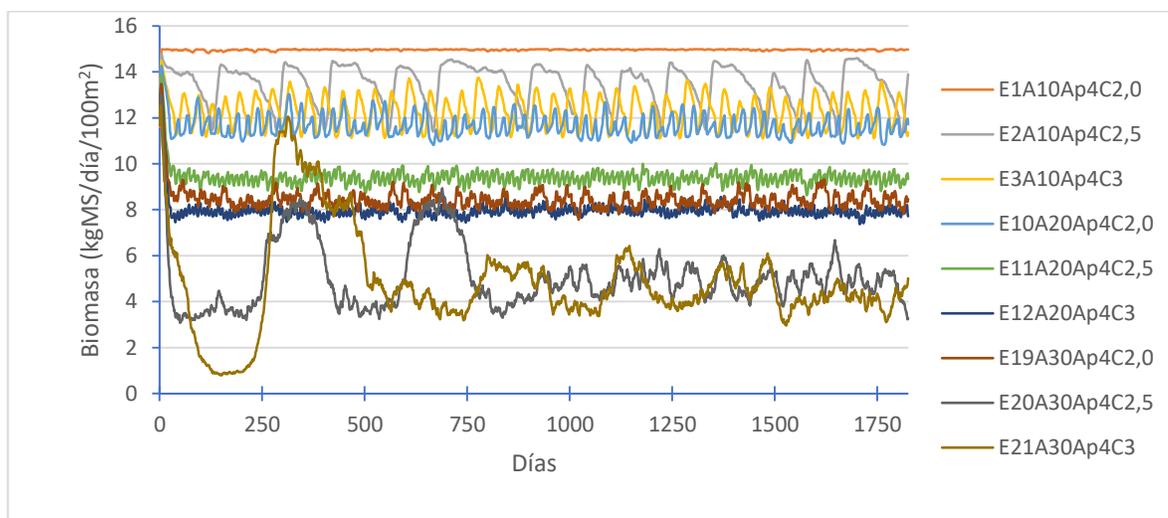


Gráfico 8. Disponibilidad de materia seca simulada de un hato de ganado vacuno en un sistema de pastoreo rotacional con cuatro apartos (10000 m²/APARTO, con disponibilidad de forraje del 35% o 1569 kg de MS), tres tipos de carga animal (10, 20 y 30 animales) y tres tasas de consumo (2, 2,5 y 3%).

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 8 se muestra el resultado de la simulación para los escenarios con cuatro apartos; donde se puede observar que el escenario 1 (E1A10Ap4C2.0), la línea de dispersión es totalmente horizontal con un valor de biomasa de 15

unidades, manteniéndose estable en el tiempo (días), lo que nos demuestra que el modelo NAMA-PRV se adapta de una buena manera, evidenciando que el sistema de pastoreo se encuentra subutilizado.

Por otra parte, en los escenarios dos, tres y 10 (E2A10Ap4C2.5, E3A10Ap4C3.0 y E10A20Ap4C2.0) se observan valores de biomasa de 11 – 14 kg/día/100m², donde la herramienta NAMA-PRV nos muestra que el sistema de rotación es apropiado sin ser subutilizado. Seguidamente en los escenarios 11, 12 y 13 (E11A20Ap4C2.5, E12A20Ap4C3.0 y E19A30Ap4C2.0) se presenta una caída de biomasa de 8 – 10 kg/día/100m², y se estabiliza en el tiempo (días), Esto indica que para ser apropiado llevarlo a cabo se tendría que realizar una suplementación, de no ser así no sería recomendable aplicarlo. De manera similar, los escenarios 20 y 21 (E20A30Ap4C2.5, E21A30Ap4C3.0) se logra determinar una caída de biomasa de 4 – 6, unidades, que se estabiliza en el tiempo (días), mostrando un colapso del sistema de rotación por lo cual no es recomendado aplicarlo.

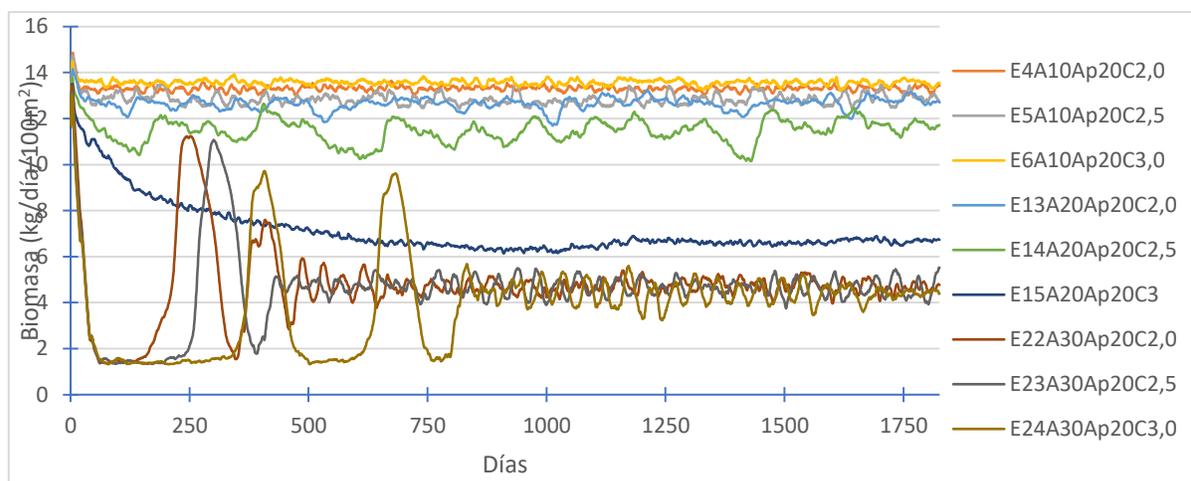


Gráfico 9. Disponibilidad de materia seca simulada de un hato de ganado vacuno en un sistema de pastoreo rotacional con 20 apartos (2000 m²/aparto, con disponibilidad de forraje del 35% o 1569 kg de MS), tres tipos de carga animal (10, 20 y 30 animales) y tres tasas de consumo (2, 2,5 y 3%).

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 9 presenta los resultados de las simulaciones con los escenarios con 20 apartos. Los escenarios cuatro, cinco, seis y 13 (E4A10Ap20C2.0, E5A10Ap20C2.5, E6A10Ap20C3.0 y E13A20ApC2.0.) se adaptan bien al sistema de producción de sistemas lecheros, inclusive con un nivel ocioso de biomasa. También se observa en las líneas de dispersión su estabilidad en el tiempo (días) manteniendo los valores de biomasa entre 12 – 14 kg/día/100m², lo que demuestra un aprovechamiento aceptable del sistema de rotación.

Por otra parte, en el escenario 14 (E14A20Ap20C2.5) la línea de dispersión observada indica que la biomasa cae y se mantiene entre 10 – 12 kg/día/100m², y se estabiliza a través tiempo (días). Con este resultado, NAMA-PRV indica que estas condiciones no son óptimas para el sistema de producción lechera, ya que se necesitaría de una suplementación para lograr productividad.

Seguidamente, el escenario 15 (E15A20Ap20C3.0) demuestra una caída abrupta en la biomasa donde se estabiliza en los valores de 6 – 7 kg/día/100m² y se mantiene en el tiempo. La simulación indica un agotamiento en la biomasa de pastura. El sistema tiende a estar saturado, por lo que no es recomendable aplicar este escenario. De la misma manera, en los escenarios 22, 23 y 24 (E22A30Ap20C2.0, E23A30Ap20C2.5 y E24A30Ap20C3.0) se visualizan puntos altos y luego decaen a niveles de 4 – 6 kg/día/100m² de biomasa estabilizando en el tiempo. La simulación del modelo NAMA-PRV prevé una situación de colapso (mal pastoreo), por lo que la recomendación es no aplicar estos escenarios en el sistema de producción lechera.

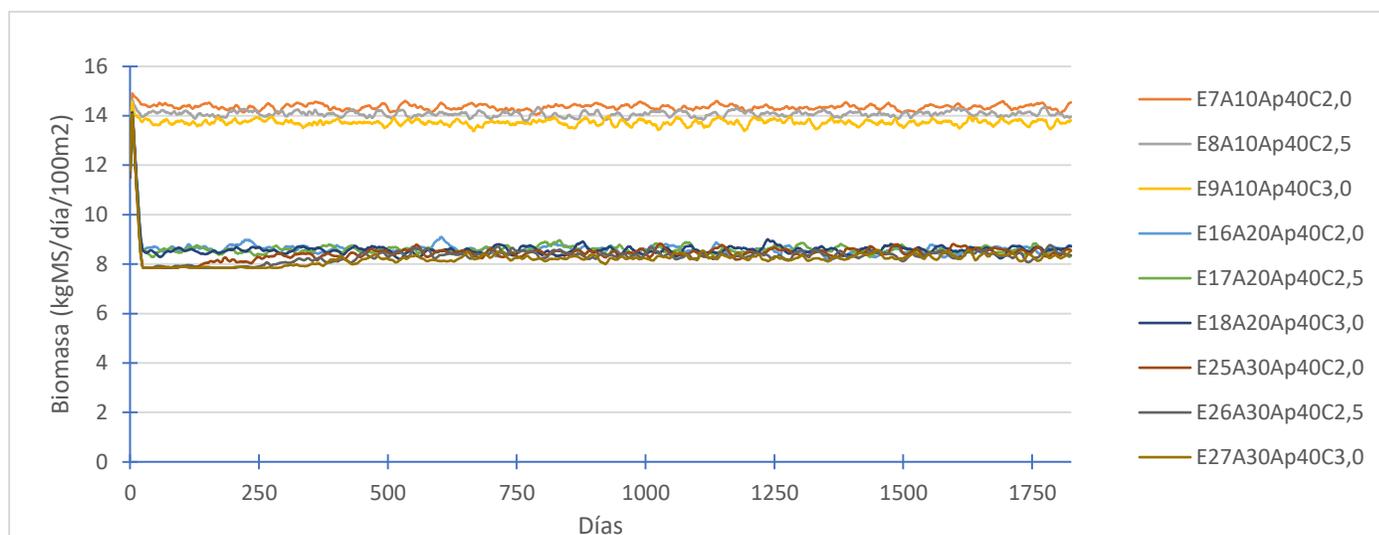


Gráfico 10. Disponibilidad de materia seca simulada de un hato de ganado vacuno en un sistema de pastoreo rotacional con 40 apartos (1000 m²/aparto, con disponibilidad de forraje del 35% o 1569 kg de MS), tres tipos de carga animal (10, 20 y 30 animales) y tres tasas de consumo (2, 2,5 y 3%).

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 10 muestra los resultados de simulación de los escenarios 40 apartos, donde se puede apreciar que los escenarios siete, ocho y nueve (E7A10Ap40C2.0, E8A10Ap40C2.5 y E9A10Ap40C3.0), son bastante estables con una biomasa de 14 -15 kg/día/100m², lo que muestra un sistema de rotación con un aceptable rendimiento, que incluso tiende a estar subutilizado.

Por otra parte en los escenarios 16, 17, 18, 25, 26 y 27 (E16A20Ap40C2.0, E17A20Ap40C2.5, E18A20Ap40C3.0, E25A30Ap40C2.0, E26A30Ap40C2.5 y E27A30Ap40C3.0) muestran una reducción de biomasa significativa, manteniéndose en 8 – 9 kg/día/100m². En estos escenarios, la disponibilidad es muy ajustada por lo que los productores no deberían utilizar esta configuración, pero con un plan de suplementación óptimo se podría implementar de buena manera, logrando la meta de ser productivo y adaptándose al sistema de rotación de manera eficiente.

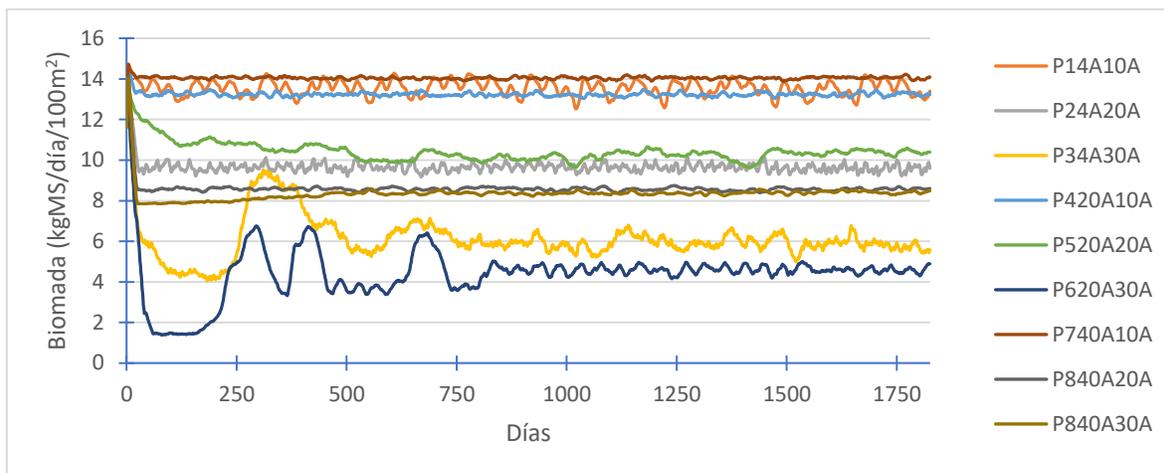


Gráfico 11. Disponibilidad de materia seca simulada de un hato de ganado vacuno en un sistema de pastoreo rotacional, utilizando promedios con 4 apartos (10000 m²/aparto), 20 apartos(2000m²/aparto) y 40 apartos(1000m²/aparto), tres tipos de carga animal (10, 20 y 30 animales), con disponibilidad de forraje del 35% o 1569 kg de MS.

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 11 nos presenta la simulación de los promedios del modelo NAMA-PRV, en donde los escenarios (P14Ap10A, P740Ap10A y P420Ap10A), nos brindan una estabilidad de biomasa estable entre 13 -14 kg/día/100m², lo que nos demuestra una buena aplicación de un sistema rotacional estando subutilizado.

Seguidamente en los escenarios (P520Ap20A, P24Ap20A, P840Ap20A y P840Ap30A), Cae la biomasa 8 -12 kg/día/100m², en estos escenarios el sistema tiende ajustarse un poco, lo que sería recomendable aplicar una suplementación para la correcta aplicación del sistema rotacional.

Por otra parte, en los escenarios (P34Ap30A, P620Ap30A), la biomasa cae abruptamente a un 4 -6 kg/día/100m², lo que nos da un indicador del que sistema tiende a desgastarse no es recomendable aplicarlo.

En síntesis, los beneficios de un buen manejo de pasturas y del pastoreo rotacional actúan en sinergia. Este sistema es usado desde hace muchos años en

la lechería. El sistema rotativo posibilita una mayor carga animal, y favorece un mejor estado nutricional de los animales (que comen pasto tierno cada día). Favorece una mayor ganancia de peso y mayor producción de leche, en función del y estado de salud del ganado y su calidad genética. Se gestiona la disponibilidad del pasto a lo largo del año. Se evita la erosión del suelo cuando éste queda descubierto en el verano. Se permite el secuestro de carbono en los pastos y menores emisiones de metano por animal, que aprovecha mejor el forraje más tierno (de mayor digestibilidad) en producción de leche.

Esta práctica responde al problema de sobrepastoreo de los potreros, lo cual resulta en invasión de malas hierbas, degradación de los suelos y baja productividad de los pastos.

El pastoreo rotacional permite que los pastos se recuperen (periodos de descanso adecuados) (MAG, 2013).

Aportes del modelo para una estrategia de adaptación al cambio climático

Se ha observado en las diferentes simulaciones que los sistemas de producción están sujetos a su disponibilidad de materia seca por hectárea, y en algunos casos a la necesidad de suplementación, ya que los modelos de rotación continúan en el tiempo según sea su ciclo, siendo el consumo de nutrientes continuo en los potreros. Por eso es muy importante tener estrategias de suplementación para salvaguardar la disponibilidad de materia seca presente en los potreros. Si esto no sucede, los sistemas comienzan a agotarse llevando al productor a realizar altas inversiones para solventar el problema.

El modelo NAMA-PRV tiene la función de simplificar la adopción de la estrategia NAMA de pastoreo rotacional, al facilitar selección de los parámetros que afinan los resultados esperados de esta estrategia que enfrenta al cambio climático, pues permite prever los resultados que obtendría un productor ante determinadas decisiones referentes a las características de los apartos, sin el esfuerzo e inversión en tiempo y recursos, generalmente muy elevados, que requeriría la experimentación mediante la implementación de sistemas reales de diferentes soluciones, hasta encontrar la que se considere óptima. Para el pequeño productor, una estrategia de ensayo o experimentación directamente aplicada a su parcela es inviable, no solo porque los tiempos empleados en evaluar resultados son prohibitivos, sino también porque el fracaso en la aplicación de un ensayo puede significar el daño o la pérdida del hato, además de graves consecuencias económicas.

Además de la facilidad de simular el impacto de diferentes decisiones sobre la parcela, se tiene, una vez determinados los parámetros a aplicar en el pastoreo rotacional, que la aplicación real en la parcela de productor constituye una solución NAMA. Esto es una medida mediante la cual se produce una reducción de los GEI, lo cual es un aporte real a la lucha contra el cambio climático. La decisión de implementar esta solución NAMA, es más difícil de tomar para el pequeño productor sin la guía que proporciona el modelo desarrollado. Es de esperar que la existencia de los resultados de las simulaciones permita a más

propietarios adaptar estas medidas. Esta es la ventaja de este tipo de modelo que (a diferencia de un modelo puramente matemático) puede presentarse a los productores que pueden "jugar" y probar muchos escenarios y discutirlos con los técnicos.

Las condiciones climáticas en el asentamiento La Poma también obligan a que la tecnificación y las medidas de adaptación necesarias para el éxito de estos productores sean mejores, para reducir este impacto. El pastoreo rotacional es una de las herramientas posibles para abordar esta situación. El modelo NAMA-PRV tiene la finalidad de facilitar la implantación de esta solución al eliminar la incertidumbre asociada a la multitud de factores que intervienen en su diseño.

Mediante esta herramienta, se afinaron los parámetros en la implementación de sistemas de rotación NAMA para la Finca La Poma, haciendo más fácil la adopción de estas medidas de adaptación al cambio climático por parte de los productores de este asentamiento.

De hecho, este modelo representa una herramienta práctica de planificación en la implantación de sistemas de apartos para el pequeño productor lácteo.

Constituye también una herramienta didáctica para el estudio de métodos de enfrentar el cambio climático, y un punto de partida hacia proyectos más ambiciosos.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. La finalidad de esta propuesta de adaptación al cambio climático es dotar a los sistemas de producción lecheros en crecimiento de una herramienta técnica de simulación que ayude en la toma de decisiones para la implementación de la tecnología NAMA de pastoreo rotacional.
2. Se determina a partir de la simulación de los diferentes escenarios de los sistemas PRV, en esta herramienta que en menor número de apartos se encuentra que las pasturas se agotan o degradan por la mala implementación del sistema de rotación. Al realizar un manejo más eficiente es posible alcanzar un mejor aprovechamiento, con el cual se puede aumentar la carga animal por hectárea hasta cierto límite, ya que si se pasa de una carga animal de 2 a 5 UA/ha el sistema tiende a agotarse requiriendo una suplementación del faltante de materia seca.
3. Se descubrió que al realizar diferentes simulaciones con diferentes tasas de aprovechamiento, la mejora es obvia, cuando esta tasa es alta, permite aumentar la carga animal o bajar el porcentaje de suplementación de materia seca.
4. La mejor propuesta que se determina para el asentamiento La Poma es implementar la tecnología NAMA del PRV tomando en cuenta un número de 40 apartos con un área de 1000 m² cada uno, con una tasa de aprovechamiento de un 35%, con una carga animal de 3 unidades por HA, asociado a un consumo de materia seca de un 2,2% del peso vivo.

Recomendaciones

1. En el uso eficiente de esta herramienta se requiere apoyo técnico para el levantamiento de la información inicial.
2. El productor debe ser conservador a la hora de hacer un cambio en la carga animal en su sistema productivo, ya que se puede generar un riesgo en el sistema de rotación agotándolo a través del tiempo.
3. Se recomienda la utilización de la herramienta en forma participativa para valorar de manera conjunta técnico-productor la mejor alternativa de un sistema de pastoreo.
4. Para futuros proyectos de graduación, se recomienda un análisis más profundo de los anteproyectos.
5. Se recomienda para futuros proyectos la realización de modelos UML como una forma de comprender y enumerar los requerimientos del proceso tratado y lograr que todos los actores involucrados estén en capacidad de entenderlos y evitar la ambigüedad.
6. Se debe perfeccionar el modelo NAM-PRV para que su utilización sea aún más sencilla y resulte más atractiva para los productores.
7. Es necesario impulsar la puesta en práctico de las recomendaciones que se obtienen del modelo, a fin de evaluarlas y tratar de que el modelo se amplíe para su aplicación por parte de otros productores.

VI. REFERENCIAS

Arias, R; Mader, T; Escobar, P. (2008). *Factores climáticos que afectan el desempeño productivo del ganado bovino de carne y leche*. Archivos de Medicina Veterinaria, Escuela de Agronomía, Facultad de Recursos Naturales. Universidad Católica de Temuco Chile. Department of Animal Science, University of Nebraska-Lincoln, USA. (40): 7-22.

Barrientos, O; Villegas, L. (2010). *Cadena productiva de leche: políticas y acciones*. Sector Agropecuario de Secretaria Ejecutiva de Planeación Sectorial Agropecuaria, Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. (2): 3-11.

Bartaburu, D; Corral, J. (2011). *Evaluación de una metodología y simulación participativa para contribuir a la comprensión y comunicación del fenómeno de la sequía y mejorar la capacidad de adaptación de productores ganaderos de Basalto*. Plan Agropecuario, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Montevideo, Uruguay. 3-44.

Bommel, P. (2019). *Modelización y simulación, algunos conceptos*. Presentación. CIRAD. Montevideo, Uruguay.

Bommel, P., Le Page, C. Bécu N. & Bousquet F.. (2012). *Building a Cormas model from scratch step by step: The ECEC model*. CIRAD. Disponible en: <http://cormas.cirad.fr/pdf/Tutorial%20ECEC-Cormas2.pdf> .

Bommel, P., Dieguez, F., Morales, H., Bartaburu, D., Duarte, E., Montes, E., Pereira, M. & Corral, J.. (2011). *One more step towards participatory modeling. Involving local stakeholders in designing scientific model for participative foresight studies*. CIRAD. Disponible en: http://cormas.cirad.fr/fr/applica/sequia/essa2011_submission_77.pdf .

Booch, G, Jacobson, I. Rumbaugh, J. (2000) *El lenguaje unificado de modelado. Manual de referencia*. Pearson Educación, S. A., Madrid. ISBN: 84-7829-037-0.

CARE. (2010). *¿Qué es adaptación al cambio climático?* Consultado el 10 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://www.careclimatechange.org>.

CATIE. (2010). *Estudio de competitividad para la transformación de los sistemas de producción de ganadería bovina tradicional en modelos de producción sostenibles en diferentes zonas agroecológicas de Costa Rica*. Programa de Ganadería y Manejo del Medio Ambiente-CATIE. Turrialba, Costa Rica. 11-41.

Chacón, M. (2019) *Costa Rica en ruta hacia la descarbonización de la ganadería 2013 - 2018*. Ministerio de Agricultura y Ganadería . San José Costa Rica.

Comisión Europea. (2006). *El cambio climático: ¿Qué es? Introducción para jóvenes*. Dirección general de medio ambiente. Luxemburgo. 4-19.

CIRAD. (2001). *CORMAS Common-pool Resources and Multi-Agents System User's Guide*. Departament of Territories, Environment and People Land and Resources Programme.

FAO. (2013). *Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación. Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería*. Roma, Italia. 1-86.

Fallot, A. (2013). *Guía metodológica PARDI problemática - Actores -Recursos - Dinámicas - Interacciones. Para el análisis de las dinámicas socio ecológicas*. Montevideo, Uruguay. 1- 21.

Fullana, C; Urquia, E. (2009). *Los modelos de simulación, una herramienta multidisciplinaria de investigación*. Consultado el 10 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://www.encuentros-multidisciplinares.org>.

Garzón, A. (2011). *Cambio climático, ¿Cómo afecta a la producción ganadera?* *Revista electrónica de veterinaria. Málaga, España*. (12): 1-8.

Gómez, C; Fernández, M. (2009). *Análisis comparativo de las emisiones de metano y efecto del cambio climático sobre la ganadería en el Perú. Los impactos del cambio climático sobre el agua y el manejo de los recursos naturales*. Cusco, Perú. 2-11.

Gómez, D. (2007). *Programando con Smalltalk*. Edit. Lin Editorial S.L. Disponible en: <https://openlibra.com/es/book/programando-con-smalltalk>.

Groves, D.; Syme, J.; Molina, E.; Calvo, C.; Gallardo, L.; Godínez, G.; ... Vogt-Schilb, A. (2020). *Costos y beneficios de la descarbonización de la economía de Costa Rica: evaluación del Plan Nacional de Descarbonización bajo incertidumbre*. Banco Interamericano de Desarrollo. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/document/Costos-y-beneficios-de-la-descarbonizacion-de-la-economia-de-Costa-Rica-Evaluacion-del-Plan-Nacional-de-Descarbonizacion-bajo-incertidumbre.pdf>

Guerra, D; Iraola, P; Sánchez, Y. (2010). *Informe de Proyecto de Grado. Presentado al tribunal de evaluación de la carrera Ingeniería en computación*. Montevideo, Uruguay. 4- 10.

Herrera, J. (2010). *Sistema de producción de leche en granjas bovinas familiares. Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación*. Texcoco, México. 2-8.

Hristov, A; Joonpyo, O; Chanhee, L; Meinen, R; Montes, F; Ott, T; Troy, O. (2013). *Una revisión de las opciones para la reducción de las emisiones de gases diferentes al CO₂. Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en producción ganadera*. Roma, Italia. 2-138.

IICA. (2015). *Elementos conceptuales y sistematización de herramientas para apoyar el análisis de impactos de la variabilidad y el cambio climático sobre las actividades agrícolas. Modelos de simulación y herramientas de modelaje*. San José, Costa Rica. 9-46.

INEC. (2019). *Resultados Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA). 2019*. Sitio web Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Costa Rica. Disponible en: <https://www.inec.cr/noticia/el-627-del-ganado-vacuno-es-para-carne>

MAG. (2013). *Manual Operativo del Piloto Nacional de NAMA Ganadería*. Programa nacional de ganadería MAG. San José Costa Rica. Consultado el 12 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://www.mag.go.cr>.

MAG; MINAE. (2013). *Un sector ganadero más eco-competitivo a través de prácticas de producción bajas en emisiones y transformacionales. Concepto NAMA fincas ganaderas*. San José Costa Rica. Consultado el 11 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://www.cambioclimaticocr.com>.

Morales, I; Murillo, L. (2015). *Análisis del censo ganadero 2014 para el sector ganadero*. Departamento de Investigación y Divulgación. San José, Costa Rica. Consultado el 12 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://www.corfoga.org>.

Naciones Unidas. (2017). *Cambio climático*. Consultado el 10 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://www.un.org>.

Nieto, J; Santamarta, J. (2003). *Emisiones de gases de invernadero por Comunidades Autónomas. Las emisiones de gases de invernadero en España por Comunidades Autónomas*. Madrid, España. (10): 2-4.

Pérez, D. (2015). *Cambio climático reduce producción de leche. San José, Costa Rica.* Consultado el 10 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://www.laprensalibre.cr>.

Pérez, E. (2008). *La venganza de la tierra. Comunidad y salud. Aragua, Venezuela.* (6). Consultado el 11 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://www.scielo.org.ve>.

Useros, J. (2012). *El Cambio climático: sus causas y efectos medioambientales.* Consultado el 11 de noviembre de 2017. Valladolid, España. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es>.

Vargas, M. (2015). *Establecimiento de 20 módulos de ganado de leche en el asentamiento La Poma. INDER construyendo un desarrollo rural equitativo y sostenible.* Cañas, Costa Rica. 3-4.

Verde, G; Hernández, A; López, L. (2012). *Cambio climático y ganadería bovina tropical. La ciencia y el hombre.* Veracruz, México. (25): 3.

Villalobos, L. Arce J. (s.f.). 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*, 37(1), pp. 91-101. ISSN:0377-9424.
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/10715>

VisualWorks User's Guide. (1995). Revisión 2.1. ParcPlace-Digitalk, Inc. Disponible en: <http://esug.org/data/Old/vw-tutorials/vw25/vw25ug.pdf>

