

# **System Dynamics applied to Modelling and Simulation of Foot-and-Mouth Disease Epidemiology**

**Omaira Cecilia Lizarazo Herrera, Carlos Alberto González Buitrago y**

**Hugo Hernando Andrade Sosa**

SIMON Group of Researches

Universidad Industrial de Santander

P.O Box 678 Bucaramanga, Santander, Colombia

E-mail: [simon@uis.edu.co](mailto:simon@uis.edu.co)

[omairaclh@latinmail.com](mailto:omairaclh@latinmail.com)

**Carlos Humberto García Castaño**

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

CORPOICA

## **Abstract**

*The present research consists of an application of System Dynamics in the study of the foot-and-mouth disease epidemiology. The objective of this proposal is to contemplate the most important dynamizing factors that participate in the phenomenon and build a structure with an insertion of these elements in a global environment context in time and spaces determined. The result of this application is a mathematical simulation model that converts in a useful tool for supporting the generation of strategies prevention and control, aimed at Foot-and-Mouth disease eradication.*

*The proposal based on the systemic approach presents the three subsystems that intervene in the dynamic behaviour of foot-and-mouth disease called infectious agent, in this case a virus, the susceptible guest in this case bovine population and the physical, biological and socioeconomical environment and interactions existing between these subsystems.*

*The model performed with the help of simulation software EVOLUTION 2.0a allows the establishment of different stages in accordance with production systems that determine several Foot-and-mouth disease ecosystems. In addition, the efficiency of applying control policies can be seen by means of the simulation models.*

*Esta labor de investigación de carácter interdisciplinario se desarrolló en el marco de las actividades del Grupo SIMON de Investigaciones de la Universidad Industrial de Santander con la participación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA-Regional.7*

## **1. Introduction**

Los fenómenos de transmisión de enfermedades hacen parte del campo biológico y por lo tanto son considerados sistemas vivos, abiertos y complejos. La Fiebre Aftosa es uno de estos fenómenos epidemiológicos de alta complejidad, es una enfermedad que además de ocasionar pérdidas económicas representadas en los tratamientos terapéuticos, en la disminución de la producción de leche y de crías (abortos) y baja de peso en los animales afectados, obstaculiza la comercialización nacional e internacional, limitando el desarrollo ganadero de los países afectados y consecuentemente, atentando contra el patrimonio de los productores. Sin embargo, la erradicación de la Fiebre Aftosa de estos países, solo será posible si se logra contemplar todos los factores dinamizadores de la presencia de la enfermedad<sup>i</sup>. Las investigaciones encaminadas al estudio de estos factores están basados en una concepción funcionalista de las enfermedades que considera los elementos de interacción virus, huésped susceptible y factores ambientales de transmisión del agente, sin una debida inserción de estos elementos en un contexto ambiental global en espacios y tiempos determinados.

## **2. Planteamiento del Problema**

Las razones fundamentales para la realización de este modelo de simulación para el análisis del comportamiento epidemiológico de la Fiebre Aftosa fueron :

- La existencia de Fiebre Aftosa en el territorio nacional y la carencia de un marco de referencia donde se involucren los principales elementos que participan en la dinámica del comportamiento de la Fiebre Aftosa, clave del éxito en los programas de control y prevención dentro del campo agropecuario.
- Las herramientas relacionadas con la Sanidad animal y de Vigilancia epidemiológica anteriormente utilizadas eran insuficientes, incapaces e inapropiadas para explicar la ocurrencia de Fiebre Aftosa.
- El escaso desarrollo de tecnología en el sector agropecuario relacionado con el uso de herramientas potentes que apoyen los procesos de decisión.
- Existen debilidades en el proceso de planificación del sector agropecuario, en lo relacionado con falta continuidad en políticas y objetivos.

Por lo tanto, los modelos de apoyo a la planeación y a la toma de decisiones en el campo agropecuario, como el presentado en este artículo, se constituyen en elementos fundamentales para quienes tienen en sus manos los procesos de toma de decisiones relacionadas con la Sanidad Animal y de Vigilancia Epidemiológica.

## **3. Antecedentes**

La importancia de la ganadería a nivel Nacional se vé en el producto interno bruto, debido a su gran participación. En la actualidad, la actividad ganadera enfrenta problemas de salud animal graves que ocasionan grandes pérdidas a los productores y constituye una de las mayores restricciones para acceder y mantener los productos en los mercados internacionales. Un caso particular es la Fiebre Aftosa que se caracteriza por ser la enfermedad animal para cuyo combate se dispone de los mayores recursos en el mundo entero.

En el año de 1950 aparecieron los primeros brotes de Fiebre Aftosa en Colombia, diseminándose a casi todas las regiones de nuestro país, incluyendo el departamento de Santander, afectando una importante proporción de la población ganadera<sup>ii</sup>. Con la

aparición de la Fiebre Aftosa surgieron una serie de problemas que repercutieron en el campo económico y social, perjudicando la competitividad de la oferta nacional en el mercado internacional y ocasionando perjuicios directos en los sistemas de producción pecuarios.

Las investigaciones sobre Fiebre Aftosa se han orientado al conocimiento de las características patogénicas, inmunológicas y serológicas del virus aftoso y a estudios relacionados con las características de la enfermedad, mejoramiento de las vacunas antiaftosa y al diseño de estrategias que buscan la erradicación de la Fiebre Aftosa, centrándose en los siguientes aspectos: Factores de Riesgo en la Fiebre Aftosa<sup>iii</sup>. Patogénesis de la Fiebre Aftosa<sup>iv</sup>, Estudios Epidemiológicos Retrospectivo de la Fiebre Aftosa en Colombia<sup>v</sup>, Estrategias Regionales para el Control de la Fiebre Aftosa, Un Enfoque Ecológico<sup>vi</sup> y Estrategias para la Prevención y Control de la Fiebre Aftosa<sup>vii</sup>.

Vicente Astudillo<sup>viii</sup>, afirma que el perfeccionamiento de los planes de combate de la Fiebre Aftosa se logra con el mayor conocimiento de la epidemiología de la enfermedad, junto al desarrollo tecnológico; este mayor conocimiento de la epidemiología de la enfermedad se logra integrando los componentes físicos, biológicos, sociales, económicos, productivos y políticos que forman parte de la conducta epidemiológica de la Fiebre Aftosa. Los modelos epidemiológicos pueden constituir útiles herramientas para lograr dicho objetivo, sin embargo, el uso de modelos para la comprensión de la epidemiología de la Fiebre Aftosa ha sido limitado. Como ejemplos tenemos el modelo de Transición de estados de la Fiebre Aftosa epidémica en Estados Unidos<sup>ix</sup> y modelo Epidemiológico para la Fiebre Aftosa endémica en áreas tropicales<sup>x</sup>.

La Teoría General de Sistemas promueve el uso de modelos en los estudios de sistemas y se ha logrado la elaboración de modelos epidemiológicos dinámicos como el de “La Ecología de la Enfermedad de Chagas<sup>xi</sup>”. Utilizando la Dinámica de Sistemas como metodología de modelación y el enfoque sistémico como enfoque, se han desarrollado modelos como el de la Fiebre Amarilla<sup>xii</sup>, de la Leishmaniasis<sup>xiii</sup>, del Dengue Hemorrágico<sup>xiv</sup> y la Enfermedad de Chagas<sup>xv</sup>.

El modelo de simulación que aquí se presenta integra de forma interdisciplinaria los estudios realizados hasta ahora tanto en el campo de la modelación como el de la enfermedad, utilizando el enfoque y metodología apropiados, de manera que se convierta en una herramienta que apoye el planeamiento y la toma de decisiones.

## **4. Modelo**

### **4.1 Conceptualización**

La Fiebre Aftosa es una enfermedad vesicular, infecciosa muy contagiosa que afecta en forma natural a las especies animales biunguladas domésticas y salvajes, sobre todo de bovinos, porcinos, ovinos y caprinos, aunque también se ha observado en otra especies animales. Es una de las enfermedades más temidas en el ganado bovino que produce efectos desastrosos en la producción del ganado y en la economía en general. La enfermedad es producida por un virus que se caracteriza por su pequeño tamaño, por poseer ácido ribonucleico (ARN), y por estar dotado de gran poder infeccioso y alta variabilidad.

La conducta de la Fiebre Aftosa en la población animal, depende de tres factores fundamentales a saber: El agente infeccioso, el huésped susceptible y el ambiente (véase Cuadro 1).

Cuadro 1. Factores que intervienen en la aparición de la enfermedad.

<i>Factor</i>	<i>Definición</i>
Agente	Organismo capaz de producir una infección o enfermedad infecciosa <sup>xvi</sup> .
Huésped	Es un animal, que en circunstancias naturales permite la subsistencia o el alojamiento de un agente infeccioso <sup>xvii</sup> .
Ambiente	Conjunto de condiciones en las que vive un organismo. El ambiente es un elemento que posee características condicionantes críticas para el desarrollo epidémico de la Fiebre Aftosa.

El ciclo de transmisión de la enfermedad se produce por la interacción de los tres factores fundamentales (agente, huésped y ambiente). Estos tres factores pueden estar interactuando y no presentarse la enfermedad, es decir, se encuentran en un equilibrio ecológico, que se representa a través de un triángulo equilátero en la Figura 1.

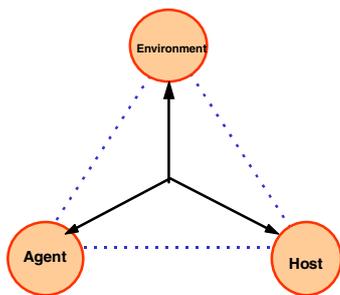


Figure 1. Triada Epidemiológica

Este equilibrio se puede romper al modificar las características del agente, del huésped o más comúnmente del ambiente. Por ejemplo, si se presenta una modificación en la virulencia (una característica del agente), el huésped ya no soporta estas características del agente, por lo tanto el equilibrio se rompe y surge el proceso de infección; o más comúnmente cuando se presentan cambios bruscos en las condiciones climáticas que modifican la densidad animal y ocasionan disminución de las defensas de los animales, rompiéndose el equilibrio y propiciando la aparición de la enfermedad.

El hombre juega un papel vital, ya que es quien altera este equilibrio, modificando las propiedades ya sea del agente, del huésped o del ambiente, llevando a la desaparición de la enfermedad o facilitando la difusión de ésta.



Figure 2. Transmisión del virus desde una fuente de infección hasta un susceptible.

El resultado de las relaciones existentes entre el agente, huésped y ambiente, es la cadena epidemiológica, es decir, la forma de transmisión del virus desde una fuente de infección a susceptibles, como se observa en la Figura 2.

La interacción se inicia cuando el agente causal (virus), presente en una fuente de infección (enfermo, portador o reservorio), sale por medio de las excreciones de los órganos infectados de los animales que portan el virus, transmitiéndose a través de unos mecanismos y entrando al organismo de un susceptible por las vías de inoculación, convirtiéndose éste en una fuente de infección que a su vez puede seguir infectando a más animales, y continuar la propagación del virus a más animales susceptibles. Esta cadena de transmisión de la enfermedad es importante, porque es aplicando medidas, ya sea en las fuentes de infección, en los mecanismos de

transmisión o en los animales susceptibles (vacunación, aislamiento, control de movilización, etc), como se rompería esta cadena y se modificaría el comportamiento de la enfermedad.

## 4.2 Marco General de Referencia

Teniendo en cuenta el marco teórico de la enfermedad mencionado anteriormente, se presenta un marco general de referencia que facilita la comprensión y desarrollo del modelo al identificar los elementos y relaciones estructurales fundamentales, que explican el comportamiento dinámico de la epidemiología asociada a la Fiebre Aftosa, representado en la Figura 3.

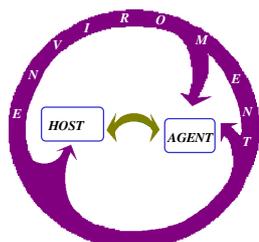


Figure 3. Marco General de Referencia

En este esquema se puede apreciar los tres subsistemas que intervienen en la dinámica de la transmisión de la enfermedad con las relaciones más importantes. Los subsistemas son: Huésped (Población Bovina), Agente (Virus Aftoso) y Ambiente.

## 4.3 Niveles de Desagregación

El proceso de modelación se desarrolló a través de la desagregación de cada uno de los subsistemas indicados, hasta alcanzar el modelo propuesto. El proceso de desagregación se describe a continuación:

### 4.3.1 Desagregación de la Población Bovina según edad y según categorías de relacionamiento Huésped-Parásito.

Se construyó un primer modelo donde se incluyeron los elementos internos del sistema, es decir, se basó en encontrar la estructura relacionada con la interacción entre el huésped y el agente, considerando las condiciones ambientales como las propicias para la ocurrencia de la enfermedad.

La población animal se desagregó en las diferentes etapas del ciclo de vida (que incide en la epidemiología de la fiebre aftosa, debido a que a mayor edad del animal menor es la susceptibilidad a la enfermedad). La población animal se dividió en becerros, terneros, novillos y adultos. Además, la población infectada ya sea terneros, novillos o adultos, se desagregó en los diferentes estadios en los que puede encontrarse el animal cuando contrae el virus, como son animales enfermos y portadores.

**Enfermos:** Animales que desarrollan lesiones propias de la enfermedad. En esta clasificación de animales enfermos se encuentran dos categorías de enfermos: Enfermos desarrollando lesiones y Enfermos recuperándose de las lesiones. Se desagregaron en estas dos categorías porque la probabilidad de estos animales de infectar un animal susceptible es diferente en cada una de ellas.

**Portadores:** Huésped que mantiene en su organismo a un agente infeccioso sin presentar signos de enfermedad<sup>xviii</sup>. Los animales portadores también se desagregaron en tres clases de portadores, debido a que el efecto de cada uno en la epidemiología es diferente (véase cuadro 2). Los animales portadores, son los de mayor importancia

epidemiológica, debido a que son animales que están infectando otros y el hombre no se está dando cuenta de ello.

Cuadro 2. Clases de portadores

<i>Portadores</i>	<i>Definición</i>
<b>Incubadores</b>	Huésped infectado en el cual el agente se encuentra en las primeras fases de multiplicación, y aún no ha dado lugar a ninguna reacción patológica.
<b>Subclínico</b>	Es el animal que no desarrolla lesiones clínicas en ningún momento del proceso infeccioso.
<b>Convalecientes</b>	Se presenta cuando el agente se mantiene dentro del huésped durante un tiempo más o menos prolongado después de la recuperación.

#### 4.3.2 Inclusión de elementos del medio que intervienen en la cadena de Transmisión de la Enfermedad.

En el segundo prototipo se incluyó la influencia del ambiente físico, biológico y socioeconómico en la ocurrencia de la enfermedad. Del ambiente físico se tuvieron en cuenta las precipitaciones como el factor que mayor peso tiene en el proceso infeccioso, debido a que afecta la densidad animal y por lo tanto la probabilidad de infección; del ambiente socioeconómico, se incluyó en este modelo el efecto de la comercialización de animales en la aparición de la enfermedad, debido a que existe mayor probabilidad de aparición de brotes en regiones donde se compran animales con mayor frecuencia; y por último, del ambiente biológico, se consideró la disponibilidad de pastos como un elemento determinante en la ocurrencia del proceso infeccioso, por afectar la densidad animal y la susceptibilidad de los animales.

#### 4.3.3 Aplicación de Estrategias de Control.

En el tercer prototipo se incluyeron las medidas que se toman tanto para prevenir la enfermedad como para controlarla. Tales medidas son: Aislamiento, control de movilización y vacunación de animales. El aumento de la complejidad de los distintos prototipos hasta llegar al modelo final se observa en las figuras 4, 5 y 6.



Figure 4. Desagregación de la Relación Huésped-Parásito

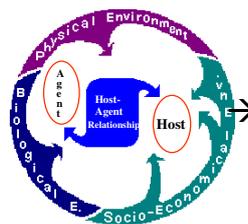


Figure 5. Inclusión de los Elementos del Ambiente

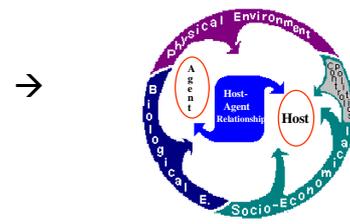


Figure 6. Inclusión de las Estrategias de Control

#### 4.4 Diagrama Causal

Entre los elementos que se incluyen en el diagrama causal están los relacionados con la estructura de la población y su dinámica, tales como terneros, novillos, adultos y tasas de natalidad y mortalidad; también se encuentran elementos relacionados con los estados inmunológicos en que puede estar el animal en cualquier etapa de su ciclo de vida como inmunes por vacunación, susceptibles y también elementos relacionados

con la aplicación de políticas de control. El comportamiento dinámico del sistema está determinado fundamentalmente por la acción combinada de siete ciclos de realimentación: Tres ciclos de crecimiento relacionados con la dinámica de la transmisión, dos ciclos de control relacionado con la dinámica de la transmisión y un ciclo de control y uno de crecimiento relacionados con la dinámica poblacional. Un análisis más detallado de estos ciclos se presenta a continuación:

En la dinámica de la transmisión de la Fiebre Aftosa se distinguen dos clases de estructuras de realimentación, tres estructuras positivas que aceleran la velocidad de infección y dos de control que regulan la aparición de nuevas fuentes de infección.

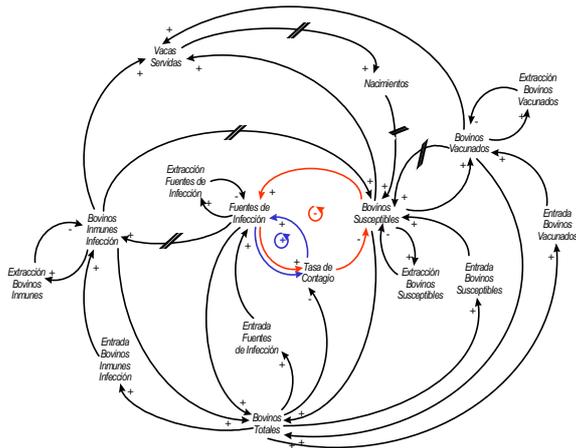


Figure 7. Diagrama Causal Dinámica de la Transmisión

Los ciclos de realimentación relacionados con la dinámica interna de transmisión de la infección se observan en la Figura 7, donde se puede apreciar un ciclo de crecimiento con líneas de color azul y uno de control con líneas de color rojo.

Otros dos ciclos de realimentación relacionados con la transmisión de la enfermedad, pero relacionados con la entrada de animales se muestran en la Figura 8 : Un ciclo positivo (líneas de color azul) y uno negativo (líneas de color rojo).

Existe otro ciclo de realimentación positivo cuyo efecto es retardado. Este se presenta cuando los animales se infectan y pasan de susceptibles a fuentes de infección, tiempo después se inmunizan a la Fiebre Aftosa. Este aumento de animales inmunes representa (después de un tiempo) un incremento de animales susceptibles, lo que repercute en el aumento de la tasa de contagio, formando el ciclo de realimentación positivo representado en la figura 8 con líneas de color verde.

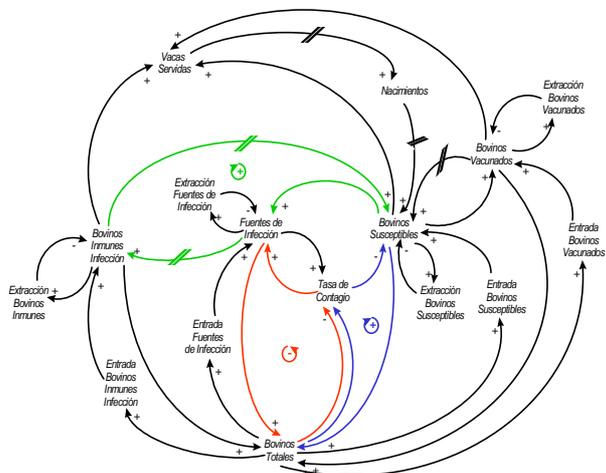


Figure 8. Diagrama Causal Dinámica de la Transmisión

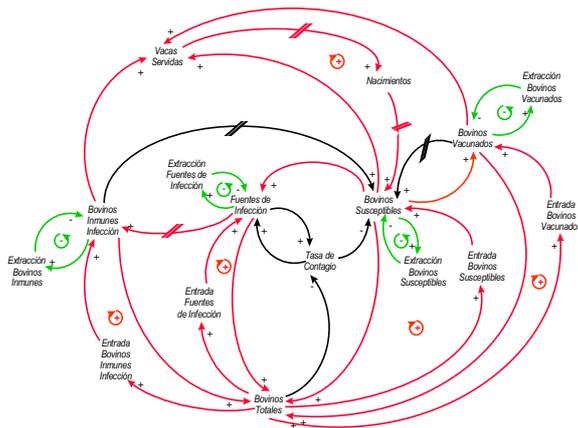


Figure 9. Diagrama Causal de la Dinámica Poblacional

Las estructuras de realimentación de la dinámica poblacional relacionadas con nacimientos, compras, ventas y muertes de animales se observan en la Figura 9. Las trayectorias que generan los ciclos de crecimiento se representan con líneas de color rojo y los ciclos de realimentación que controlan el crecimiento de la población están representados con líneas de color verde.

#### 4.5 Diagrama de Forrester

En la Figura 10, se observa un diagrama de Forrester bastante general, pero de fácil comprensión del modelo propuesto que clasifica por colores las variables dependiendo del aspecto que considera.

Las variables de color azul son las relacionadas con la dinámica poblacional (becerros, terneros, novillos, adultos y animales viejos), las de color rosado están relacionadas con la dinámica de la transmisión de la enfermedad (enfermos y portadores), las verdes relacionadas con la vacunación de animales (terneros vacunados, novillos vacunados y adultos vacunados) y las amarillas relacionadas con la comercialización de animales (ingresos y egresos de terneros, novillos y animales adultos).

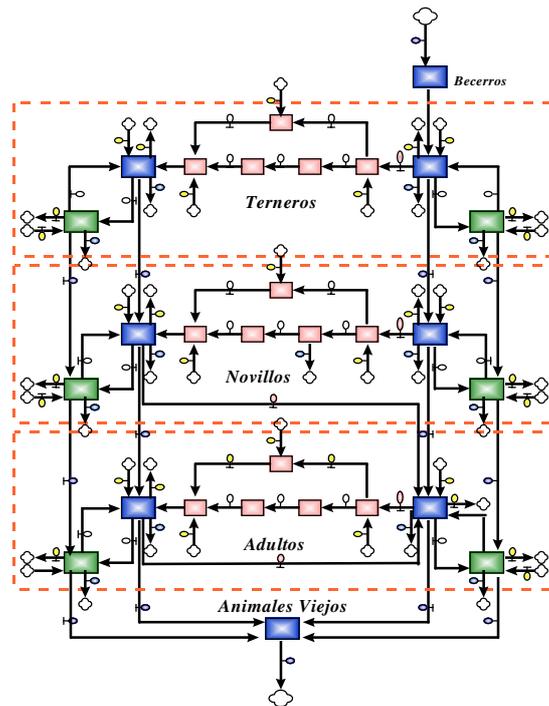


Figure 10. Diagrama de Forrester General

El diagrama de Forrester del modelo final no se incluye por cuestiones de espacio, debido a que es un modelo bastante grande y complejo.

#### 4.6 Modelo Matemático

El modelo matemático está constituido por 288 ecuaciones y 440 relaciones. De las 288 ecuaciones 29 corresponden a ecuaciones de nivel, 100 a ecuaciones de flujo, 57 ecuaciones de variables auxiliares, 8 multiplicadores, 59 parámetros y 35 retardos.

### 5. Simulación y Análisis de Comportamiento

Para la simulación del modelo se utilizó el software *Evolución 2.0a<sup>xix</sup>*, la única herramienta en español, que junto con otras cuatro en inglés, soportan el proceso de

modelación con Dinámica de Sistemas, construido en el Grupo SIMON de investigaciones de la Universidad Industrial de Santander.

La unidad espacial del modelo es el área del foco, dada en hectáreas. La unidad temporal de simulación es el día, entendida como el menor rango de tiempo en el cual ocurre un cambio en la población.

El escenario de simulación es definido por los parámetros que determinan la distribución de la población por grupo de edades dependiendo de su estado inmunológico, también se encuentran variables inherentes a la comercialización de animales y por último, variables relacionadas con las políticas de control. Para la creación de estos escenarios se utilizó información proveniente del sistema de información de vigilancia epidemiológica y sanidad animal de CORPOICA-Regional 7, y los relacionados con aspectos climatológicos fueron suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología, Adecuación de Tierras y Estudios Ambientales (IDEAM.) -Seccional Bucaramanga..

Se construyeron escenarios de acuerdo al concepto de sistema de producción ganadero; estos sistemas contienen en su propia estructura los componentes epidemiológicos, que determinan una particular composición del rebaño, una densidad específica, ingresos y egresos de individuos en épocas precisas, que representan las formas específicas y concretas que asume la organización de la producción animal en una estructura económica y social definida, que influye decisivamente en el comportamiento de la enfermedad. Estos escenarios corresponden a los sistemas de cría preempresarial, cría empresarial y engorde empresarial y sus comportamientos simulados con el modelo se muestran a continuación.

### ■ Sistema de Producción de Cría Empresarial

Este sistema de producción se caracteriza por realizar la actividad de cría de animales, es decir, tienen hembras para obtener de ellas sus crías. Debido al carácter empresarial, se presenta el uso más intensivo de la tierra y mayor uso de tecnología. Como es un sistema de cría, se presenta un predominio de animales adultos. La distribución por grupo de edades de este sistema se muestra en la figura 11, donde se observa un predominio de animales adultos y terneros.

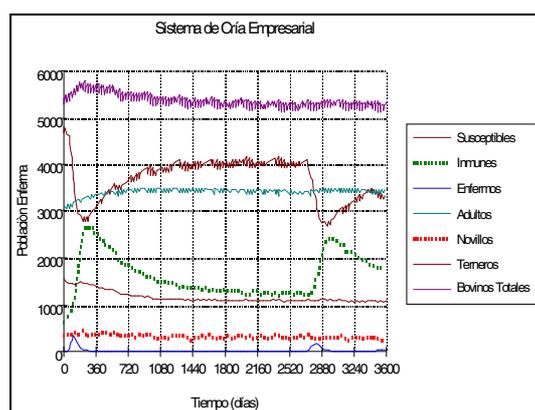


Figure 11. Distribución por grupo de edades.

En este sistema de producción si se presenta una baja cobertura vacunal y ocurre la entrada de fuentes de infección, se genera un proceso epidémico explosivo (debido a la gran susceptibilidad poblacional), que repercute en la disminución de la población susceptible y el consiguiente aumento de la población inmune como se ve en las figuras 11.

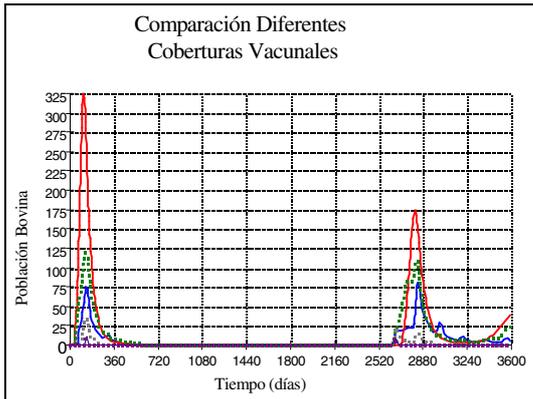


Figure 12. Comparación de animales enfermos, con diferentes niveles de vacunación.

El efecto de la vacunación con diferentes coberturas vacunales se presenta en la figura 12, donde se observa la disminución de la población enferma a medida que aumenta la cobertura vacunal, sin embargo, a pesar de que haya una gran cobertura vacunal, si se presentan entradas de fuentes de infección, están alcanzando a producir procesos infecciosos, no tan graves pero los genera. Por lo anterior, se demuestra que es necesario controlar la movilización si se quiere definitivamente eliminar la enfermedad.

### ■ Sistema de Producción de Cría Preempresarial

Este sistema de producción se caracteriza por realizar la actividad de cría de animales con un carácter de economía campesina o de ganadería de subsistencia. Debido al carácter preempresarial, se presenta una baja inversión tecnológica, representada en bajas densidades poblacionales y coberturas vacunales bajas o inexistentes. Además, se presenta poca comercialización de animales, es decir, existe una baja tasa de recambio y renovación lenta de animales.

En la figura 13 se observa predominio de animales adultos en el sistema y un comportamiento estable a través del tiempo de la población. Los terneros también se presentan en una proporción importante, constituyendo el producto a comercializar. Además se observa un número medio de inmunes producto de la exposición continua de los animales a fuentes de infección, y un número adecuado de susceptibles que permite la endemización (presencia constante y baja de enfermos) del proceso infeccioso.

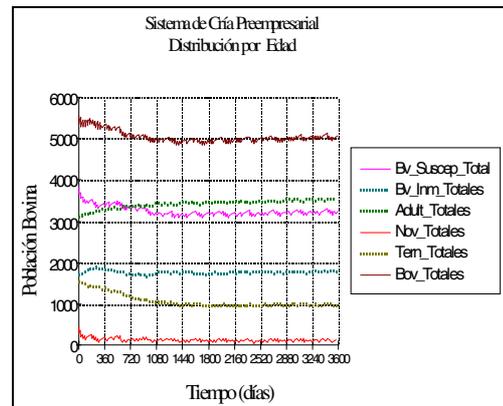


Figure 13. Distribución por grupo de edades.

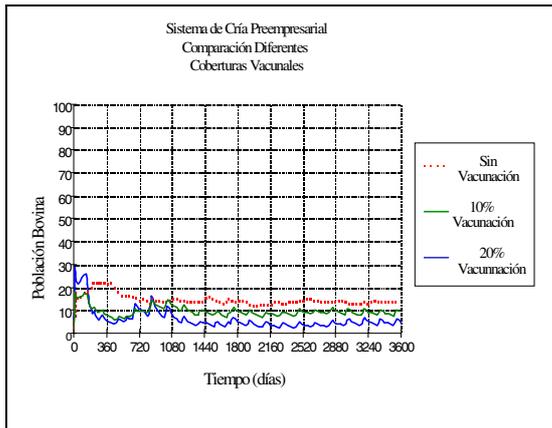


Figure 14. Comparación de los animales enfermos, con diferentes niveles de vacunación.

características de este sistema (baja densidad y entradas bajas o nulas), no es necesario alcanzar una cobertura vacunal del 100% para lograr la desaparición de la enfermedad. En la comparación realizada en la figura 14, se puede apreciar las diferencias entre los distintos niveles de vacunación.

Los sistemas de cría preempresarial determinan ecosistemas endémicos primarios, es decir, la enfermedad se presenta de manera constante y continua; por esta razón se plantea la hipótesis de la permanencia del agente a través del paso de dosis infectante de bovinos aparentemente inmunes (portadores convalescentes) a bovinos susceptibles.

Por medio de simulaciones (figura 15), se muestra que si los portadores convalescentes no intervienen en el proceso epidemiológico es muy difícil que la infección se mantenga a través del tiempo; el pico infeccioso solo se mantiene 60 días y es atribuido al tiempo tardan las fuentes de infección iniciales en las diferentes etapas de la enfermedad (incubación, enfermos desarrollando lesiones y recuperándose de ellas), con lo cual se demuestra que esta hipótesis es cierta.

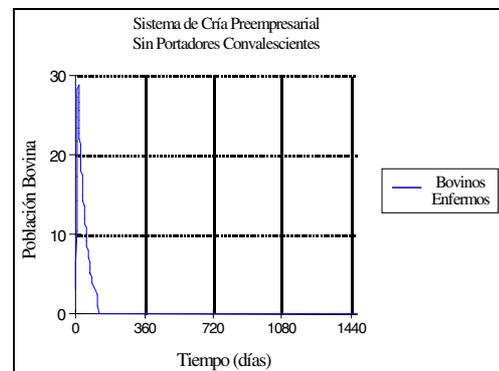


Figure 15. Animales enfermos sin portadores convalescentes como fuentes de infección.

Como los ingresos en este sistema son escasos, la influencia de las entradas es escasa. Por lo tanto, el control de movilización en este sistema de producción, no tiene importancia ni incidencia en la epidemiología de la enfermedad.

## ■ Sistema de Producción de Engorde Empresarial

La distribución de los elementos que intervienen en la epidemiología de la fiebre aftosa dentro del marco de un sistema de producción de engorde empresarial se presenta en la figura 16, donde se observa un número de animales susceptibles alto, sin embargo, disminuye cuando se presentan epidemias, ocasionando el aumento de inmunes.

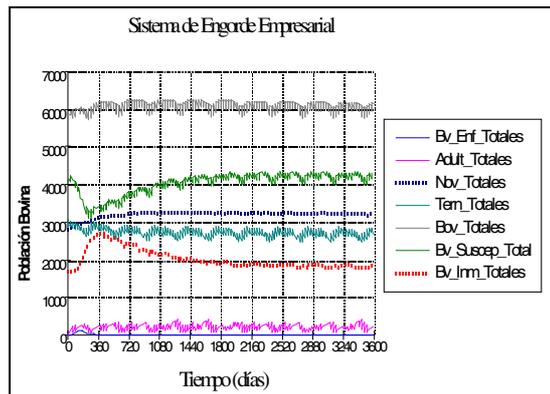


Figure 16. Distribución por grupo de edades.

En cuanto a la distribución por grupo de edades, la figura 16 muestra un predominio de los animales jóvenes.

Debido al predominio de animales jóvenes, hay mayor susceptibilidad en el rebaño, debido a las pocas experiencias previas que los animales jóvenes han tenido con el virus, de tal manera que ante las continuas entradas de fuentes de infección y ante la existencia de una baja cobertura vacunal, se generan procesos epidémicos explosivos y con mayor frecuencia que en un sistema de cría preempresarial (figura 17).

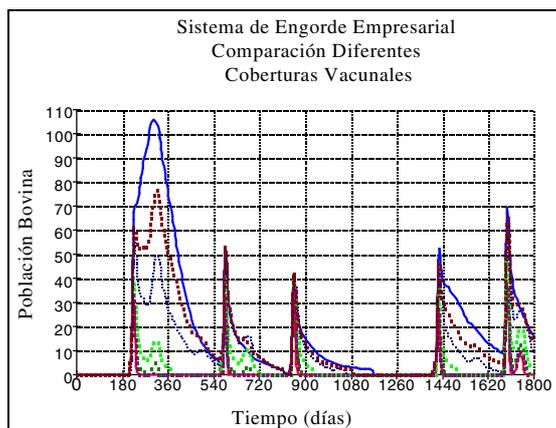


Figure 17. Comparación de animales enfermos, con diferentes niveles de vacunación.

Este sistema por su carácter empresarial posee mayores coberturas vacunales. Sin embargo, los resultados que arroja el modelo muestran que no es suficiente con la aplicación de niveles altos de vacunación para controlar la enfermedad. Esto debido a las altas y constantes entradas de animales y al intensivo uso de la tierra que ocasiona altas densidades y tasas de contagio. La comparación de los animales enfermos con diferentes niveles de vacunación se observa en la figura 17.

Según pruebas realizadas con el modelo de simulación, si se aplican controles en la movilización de animales, controlaríamos en gran parte la transmisión de la enfermedad, según lo muestra la figura 18.

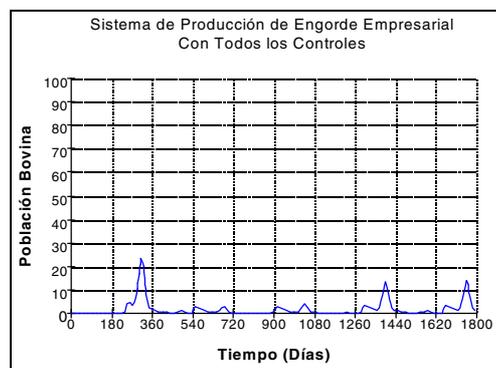


Figure 18. Animales enfermos, aplicando todos los controles.

En la figura 19, se compara el comportamiento de la Fiebre Aftosa en

los tres sistemas de producción analizados. Se observa en un sistema de cría preempresarial bovinos enfermos en una proporción baja, pero en forma continua durante el período de simulación, a diferencia del sistema de cría empresarial donde se puede ver un comportamiento ocasional pero explosivo de los enfermos, por otro lado se observa en el sistema de engorde empresarial epidemias frecuentes y de gran intensidad.

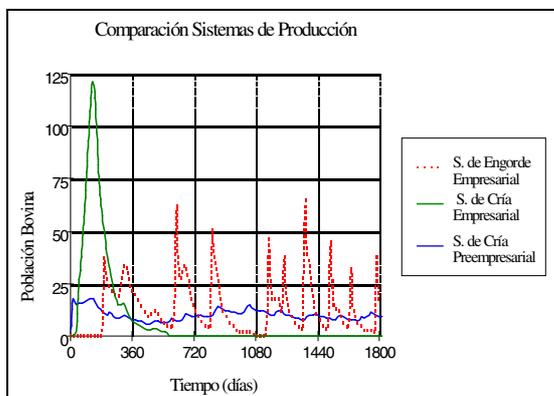


Figure 19. Comportamiento de la enfermedad en los tres sistemas de producción.

Los meses de mayor incidencia están asociados a la época de mayor movimiento de animales, coincidiendo también con el aumento proporcional de animales en los grupos de edades de mayor susceptibilidad, es por esta razón que el control de la movilización, es una medida muy importante para lograr la erradicación de la enfermedad en una región.

La utilización del modelo de simulación se realiza por medio de una interfaz que esta encaminada a facilitar la simulación del modelo, de manera que no es necesario que el usuario sea un experto en dinámica de sistema ya que se orienta al usuario para su utilización. Esta interfaz ofrece la posibilidad de realizar tareas como ver información relacionada con el modelo de simulación, experimentar con el modelo y ver información relacionada con los autores del modelo y las entidades involucradas.

## 6. Conclusiones

- Esta investigación presenta un marco general de referencia para la construcción de modelos de cualquier enfermedad, teniendo en cuenta de manera general los tres subsistemas que siempre intervienen en la aparición y desarrollo de la enfermedad.
- El modelo objeto del presente trabajo se constituye en una totalidad que integra el conocimiento del fenómeno de la Fiebre Aftosa, que potencializa la labor de investigación y además constituye un avance en la búsqueda de posibles soluciones a la problemática de la epidemiología de la enfermedad, en donde se pone de manifiesto los vacíos tanto de datos como de información, de manera que pueda constituirse en guía para el desarrollo del proceso investigativo de la Fiebre Aftosa y de otros problemas epidemiológicos que aquejan a la población bovina.
- El modelo producto de esta investigación constituye una herramienta de uso académico en donde se da la oportunidad a los usuarios de explorar sus propias ideas acerca del fenómeno y buscar soluciones a los problemas del mismo.
- Este modelo se fundamentó en estudios regionales y socioeconómicos ya que la organización social de la población bovina, depende casi exclusivamente de la apropiación que el hombre organizado hace de ellas para su beneficio y ésta a su vez interviene en la aparición de los brotes y la distribución de los mismos, por esta

razón la inclusión de las estructuras de producción es avance importante en la modelación de fenómenos epidemiológicos.

## 7. Referencias

- 
- <sup>i</sup> Year 2001. Santander without Foot-and-Mouth disease. En : Técnica. Instituto Colombiano Agropecuario. Bucaramanga. Colombia. pp 5.
- <sup>ii</sup> INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. (1983). Project to fight against Foot-and-Mouth disease in Colombia.. Santafé de Bogotá: ICA.
- <sup>iii</sup> CARDONA, A, VILLAMIL, L.C, ORREGO U, A, and Others. Risk Factors associated with Foot-and-Mouth disease: Avances en Medicina Veterinaria Preventiva. Universidad de Caldas. Manizalez. Colombia. pp 53-56.
- <sup>iv</sup> VELANDIA U, J. (1975). Patogénesis de la Fiebre Aftosa. Instituto Colombiano Agropecuario. Seccional Santafé de Bogotá. Boletín Técnico N.32. Santafé de Bogotá. pp 43-55.
- <sup>v</sup> CARDONA, U. (1982). Estudio Epidemiológico Retrospectivo de la Fiebre Aftosa en Colombia. Programa Universidad Nacional de Colombia. Instituto Colombiano Agropecuario. Santafé de Bogotá.
- <sup>vi</sup> ROSENBERG, F, ASTUDILLO, Vicente and GOIC, Roberto. (1979). Regional strategies for Foot-and-mouth disease, under an ecology approach. Universidad del Tolima. Ibagué. Colombia. pp 107-119.
- <sup>vii</sup> ACEBEDO, F. (1982). Strategies for preventing and controlling the Foot-and-mouth disease. Instituto Colombiano Agropecuario. Bucaramanga. Colombia.
- <sup>viii</sup> ASTUDILLO, V. (1996). Participación Social en la Erradicación de la Fiebre Aftosa en América del Sur. Conferencia Internacional sobre Perspectivas para la Erradicación de la Fiebre Aftosa en el siguiente Milenio y su impacto en la Seguridad alimentaria y el comercio: Enfoque en las Américas. Brasilia. 1996.
- <sup>ix</sup> THRUSFIELD, M. (1990). Veterinarian Epidemiology. Editorial Acribia. Zaragoza.
- <sup>x</sup> AYCARDI, E and MORALES, G. (1977). An epidemiological model for Endemic Foot-and-Mouth disease in tropical areas. In ACOVEZ Magazine. Santafé de Bogotá. pp 6-9.
- <sup>xi</sup> RABINOVICH, J. (1988). A mathematical model of the ecology Chagas disease: Epidemiology and Control. Instituto Nacional de diagnóstico e investigación de la enfermedad de Chagas. Buenos Aires.
- <sup>xii</sup> MARTINEZ, S and REQUENA, A. (1984). System Dynamics. 2. Models. Alianza Editorial. Madrid.
- <sup>xiii</sup> ANDRADE S, H, GELVEZ, L and MUSKUS, Z. (1994). Mathematical simulation model for the study of the transmission dynamics of Leishmaniasis under a systemic approach. SIMON Group of Researches. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. pp 32, 42.
- <sup>xiv</sup> ANDRADE, H, GONZALEZ, S y VELASQUEZ, E. (1995). Mathematical simulation modelo for Aedes Aegypti controlling in Epidemias de Dengue Clásico y Dengue Hemorrágico, un a systemic approach. SIMON Group of Researches. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia.
- <sup>xv</sup> ANDRADE, H, PLAZAS, M y MEZA, N. (1997). Mathematical model of epidemiology and Control of Chagas disease. SIMON Group of Researches. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia.

- 
- <sup>xvi</sup> Programa de Adiestramiento en Salud Animal para América Latina. (1986). Cuarentena Animal. Enfermedades Cuarentenables. Vol. 1. OPS. Ediciones Terra Nova. pp 65
- <sup>xvii</sup> Programa de Adiestramiento en Salud Animal para América Latina. (1988). Vigilancia Epidemiológica. Vol. 1. OPS Ediciones AguaFuerte. pp 231, 252.
- <sup>xviii</sup> Programa de Adiestramiento en Salud Animal para América Latina. (1986). Cuarentena Animal. Enfermedades Cuarentenables. Volumen 1. OPS. Ediciones Terra Nova. pp 72-74
- <sup>xix</sup> ANDRADE, H, DURAN, P and ARDILA, C. (1994). Technical Guide User Manual of Evolución 2.0. SIMON Group of Researches. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia.