



Modelo poblacional de ganado estructurado en edades y sexo

Simoy, Mario Ignacio*

Instituto Multidisciplinario sobre Ecosistemas y Desarrollo Sustentable
(UNCPBA - CICPBA), Tandil, Argentina.

Instituto de Investigaciones en Energía No-Convencional
(UNSa - CONICET), Salta, Argentina

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Resumen

Los modelos matemáticos aplicados a los sistemas ganaderos constituyen una herramienta de análisis y de planificación de estos sistemas, que pueden utilizarse tanto para mejorar la rentabilidad de los mismos, como también con fines sanitarios.

En este trabajo se presenta un modelo en ecuaciones diferenciales estructurado en edades y sexo que permite simular la dinámica de una población ganadera considerando las prácticas de manejo usuales. En el modelo se incorporan los movimientos de animales a partir de la base de datos provista por el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria de Argentina.

Se presentan los resultados de las simulaciones del modelo y se analizan las diferencias existentes entre la dinámica poblacional de los departamentos destinados a la cría de ganado y los destinados al engorde.

Trabajo realizado en conjunto con:

Simoy, María Verónica, Facultad de Cs. Exactas. Instituto Multidisciplinario sobre Ecosistemas y Desarrollo Sustentable (UNCPBA - CICPBA), Tandil, Argentina.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Canziani, Graciela Ana, Facultad de Cs. Exactas. Instituto Multidisciplinario sobre Ecosistemas y Desarrollo Sustentable (UNCPBA - CICPBA), Tandil, Argentina.



*E-mail: ignacio.simoy@gmail.com

1. Introducción

Los sistemas ganaderos, en particular aquellos dedicados a la cría de ganado, constituyen sistemas dinámicos en los cuales las variables intrínsecas del mismo (tasas reproductivas, índices productivos, etc.) interactúan con factores externos (precios de insumos y productos, variables climáticas, etc.) [7]. En este sentido, el modelado del sistema es una herramienta adecuada para capturar y procesar esta complejidad posibilitando el análisis de diversas situaciones y el impacto de éstas en el sistema [8].

Durante 2017, las cadenas agroalimentarias produjeron en Argentina el 17 % del total del empleo privado (directo e indirecto). En el sector de producción de carne, en 2017 la carne vacuna representaba el 52 % del total de carne producida en el país. En 2018, se faenaron 13.4 millones de cabezas de ganado, el 6 % más en comparación con el año 2017 [6]. Para el año 2017, la industria manufacturera de origen agrícola y ganadera representó el 40 % del producto bruto interno agrícola del país [6]. Por otro lado, 230.202 y 312.052 miles de toneladas de carne vacuna fueron exportadas en los 2016 y 2017, respectivamente. Los mayores mercados de carne fueron China y Rusia [12].

En Argentina diferentes actividades productivas son llevadas adelante en distintas regiones del país, debido a las diferencias existentes en la fertilidad de los suelos y la calidad de las pasturas producidas [9]. En áreas donde la calidad de los suelos es pobre y las pasturas son de baja calidad, la actividad principal es la cría. Mientras que en áreas con mejor calidad de suelos y mejores pasturas se encuentran los establecimientos de recría y terminación [1]. Se estima que menos del 30 % de los terneros son terminados en la misma región en la que nacieron. El resto de ellos son enviados a otras regiones con mejores suelos y climas donde la producción y la calidad de las pasturas es superior y los animales pueden ser engoradados más eficientemente [9]. De esta forma, los animales son trasladados desde y hacia diferentes regiones del país. Estos movimientos de animales son registrados por las autoridades del Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) y almacenados en una base de datos nacional denominada SIGSA.

Existen en la actualidad diversos modelos para simular la dinámica del rebaño, principalmente desde un punto de vista económico [7] o para evaluar las interacciones entre el ganado y el medio ambiente [3]. En este trabajo se presenta un modelo poblacional que permite analizar la dinámica del rebaño. El mismo es lo suficientemente versátil para adaptarse a diferentes escenarios y prácticas de manejo, así como para analizar la dinámica de enfermedades que afectan a la población de ganado. En este sentido, se considera que trabajar con ecuaciones diferenciales (de forma similar a lo propuesto por [11]) sería el enfoque apropiado.

El modelo desarrollado en el artículo se encuentra estructurado en sexo y en edades e incluye las prácticas de manejo usuales en Argentina, tales como el servicio estacionado, las pariciones y el destete. Por simplicidad las ventas de ganado son consideradas de forma mensual, teniendo en cuenta la base de datos de movimientos provista por SENASA. Así, el modelo puede ser utilizado para analizar diferentes prácticas de manejo, y puede ser adaptado para fines sanitarios.

2. Materiales y métodos

2.1. Bases de datos utilizadas

En este trabajo se utilizaron dos bases de datos provistas por SENASA. Una conteniendo el stock ganadero al día 1 de Enero de 2017 para cada uno de los departamentos del país, clasificado por edad y sexo, y otra que contiene los movimientos de animales realizados durante ese año.

Para trasladar ganado por cualquier motivo, los productores deben solicitar a SENASA la emisión del Documento de Tráfico Electrónico (DT-e), que habilita la movilidad de los animales por el territorio argentino. Para cada evento de movimiento se registra la siguiente información: la provincia y departamento de origen y de destino, el identificador único del establecimiento de origen y de destino (número RENSPA), la fecha en la que se realizará el movimiento (nosotros contamos solo

con el mes del movimiento), especie, categoría etaria y cantidad de animales que serán movilizados, motivo del movimiento y el tipo de explotación ganadera de origen y destino (establecimiento ganadero, mercado concentrador o frigorífico/matadero). Esta información es almacenada por SENASA en una base de datos nacional denominada Sistema Integral de Gestión de Sanidad Animal (SIGSA).

2.2. Población ganadera en Argentina

Argentina se organiza como un estado federal descentralizado compuesto por 23 provincias y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), esta última designada como la Capital Federal del país. Las provincias dividen su territorio en áreas administrativas secundarias denominadas departamentos ($n = 513$).

En Enero de 2017, de acuerdo a la base de datos provista por SENASA, la población ganadera en Argentina estaba compuesta por aproximadamente 55 millones de cabezas de ganado. La distribución del ganado por sexo y edad se presenta en la Tabla 1.

Categoría	Número de animales	% Nacional
Terneros	7208756	13.03
Novillitos	4833928	8.74
Novillos	2725463	4.93
Toritos	212963	0.38
Toros	1084777	1.96
Terneras	7323430	13.23
Vaquillonas	8417321	15.21
Vacas	23532670	42.52
Total	55339308	100

Tabla 1: Distribución de la población ganadera por sexo y edad al 1 de Enero de 2017, de acuerdo a la base de datos.

2.3. Procesamiento de la base de datos

A partir de la base de datos de movimientos se confeccionaron dos tablas para cada uno de los meses del año 2017: una con la información de los movimientos desde un establecimiento ganadero o mercado concentrador con destino hacia otro establecimiento ganadero o mercado concentrado (denominadas tablas DEPTO-DEPTO), y otra con los movimientos que tenían destino a faena (denominadas tablas DEPTO-FRI). En cada tabla se registró el departamento de origen y de destino, el mes en el que se realizó el movimiento y el número de animales transportados en cada una de las categorías.

Las clases novillito y novillo son difíciles de diferenciar en el campo. Así, lo que para un productor es un novillo, para otro puede ser un novillito. Para evitar esta situación, los novillos y novillitos fueron agrupados en una única clase denominada novillo.

Los departamentos del país fueron clasificados en departamentos de tránsito (aquellos que tienen un stock menor o igual a 400 animales) y departamentos de no tránsito (aquellos que tienen un stock ganadero superior a 400 animales).

2.4. Prácticas de manejo

Teniendo en cuenta las clases en las que está estructurada la base de datos, se puede construir el grafo del ciclo de vida de los individuos que se muestra en la Figura 1.

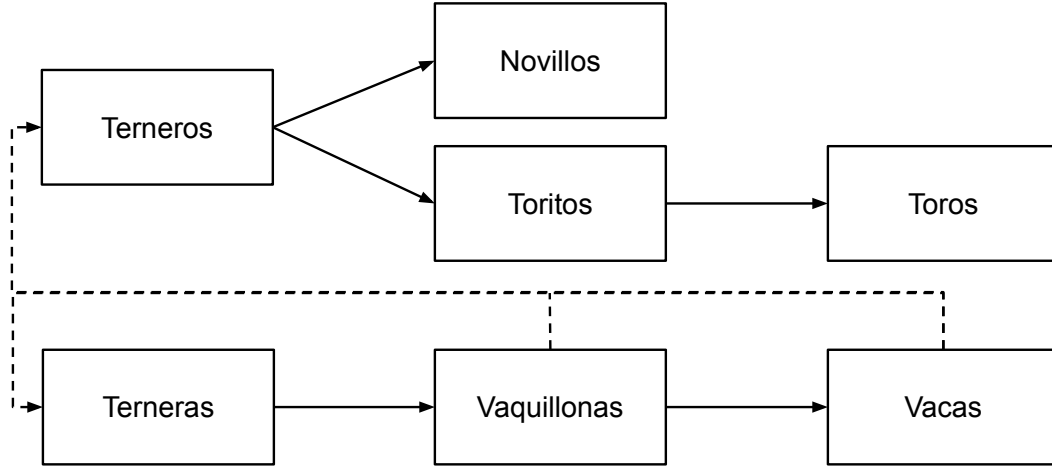


Figura 1: Gráfico del ciclo de vida de la población.

La transición de los individuos entre las diferentes categorías se debe a cuestiones tanto etarias como de manejo (servicio, parición y destete) [2]. Este grafo se puede interpretar de la siguiente forma. Una vez que las vacas o vaquillonas tienen cría, ésta puede ser un ternero o una ternera. En el caso de los terneros, luego del destete éstos pueden ser novillos o toritos. La diferencia entre estas categorías es que los toritos serán destinados a la reproducción (no son castrados), mientras que los novillos se castran y se destinarán a la producción de carne. Los toritos serán considerados toros cuando hayan ingresado a servicio por primera vez. En el caso de las hembras, las terneras pasarán a ser vaquillonas una vez destetadas. Las vaquillonas destinadas a la reproducción serán consideradas vacas una vez que hayan tenido la primer parición, mientras que las destinadas a la producción de carne lo serán cuando hayan alcanzado un peso determinado.

2.4.1. Distribución del servicio, nacimientos y destete.

En este trabajo se consideró un servicio mayoritariamente estacionado durante el trimestre octubre - noviembre, dado que se estima que el 80 % de las cabezas de ganado del país están sometidas a dicha práctica de manejo (Marcelo Ballerio, Director de Control de Gestión y Programas Especiales - SENASA, comunicación personal).

De esta forma, se consideró que dentro de un departamento el 80 % de los vientres están sometidos al servicio de primavera, el 10 % al servicio de otoño y el 10 % restante se distribuye entre los demás meses. Esta distribución del servicio produce una distribución similar de los nacimientos, pero con un corrimiento de 9 meses hacia adelante (aproximadamente 270 días, tiempo que será denotado como t_s), es decir, $s(t) = b(t + t_s)$ donde $b(t)$ y $s(t)$ son las distribuciones de los nacimientos y el servicio, respectivamente. Esto significa que los animales que son servidos en el día t , tendrán cría el día $t + t_s$, es decir, 9 meses más tarde.

A su vez, la distribución de los nacimientos dentro de cada trimestre no es uniforme, se distribuye un 50 % en el primer mes, un 30 % en el segundo y un 20 % en el tercero [13].

El destete de los terneros y terneras se realiza t_d días después del nacimiento, así la distribución de los mismos será $d(t) = b(t - t_d)$, es decir, que los animales que se destetan el día t son los que nacieron t_d días antes. A pesar de que el destete de los animales en el campo se realiza en forma de pulso en algunos momentos del año, para el planteo del modelo mantendremos la distribución teórica $d(t)$.

La Figura 2 muestra el gráfico de las distribuciones $s(t)$, $b(t)$ y $d(t)$ en función del tiempo. Al ser

distribuciones, son todas funciones con integral igual a 1 durante el periodo de un año.

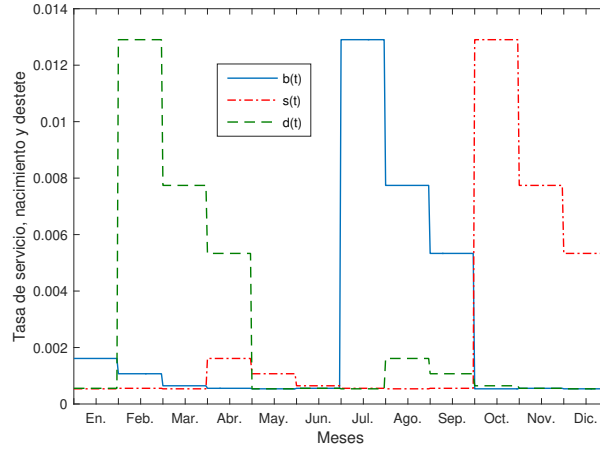


Figura 2: Distribuciones $s(t)$, $b(t)$ y $d(t)$ en función del tiempo.

2.4.2. Reposición de animales

Los animales destinados a la reproducción (toros y vacas), poseen una vida útil determinada, y cada año se debe eliminar una proporción de ellos y reponerlos con animales jóvenes [13]. Dado que siempre se intenta mantener la misma cantidad de vientres en el rodeo, los animales que se eliminan deben reponerse en su totalidad, a menos que el productor decida lo contrario.

Se supondrá que los animales están uniformemente distribuidos dentro del estadio Vaca y Toro, por lo tanto, tendremos que la proporción de reposición anual está dado por

$$\begin{aligned}\rho_M &= (\text{vida util toros})^{-1} \\ \rho_H &= (\text{vida util vacas})^{-1}\end{aligned}\tag{1}$$

donde ρ_M y ρ_H es la proporción de reposición anual de toros y vacas respectivamente. Estos individuos que salen de la categoría, deben reponerse con individuos de la clase anterior.

Si $V(0)$ es la cantidad de vacas presentes en un departamento a principio de año, una proporción ρ_H de estas vacas se descartará, siendo éstas reemplazadas por vaquillonas. De esta forma, al comienzo del próximo año se contará con la misma cantidad de vientres para poner en servicio.

Se supondrá que las vacas que están en los departamentos se destinan a cría. Como se verá más adelante, esta suposición tan fuerte se compensará mediante la eficiencia reproductiva.

2.5. Modelo desarrollado

La dinámica del rebaño de un departamento se modeló mediante un sistema de ecuaciones diferenciales considerando las categorías en las cuales está estructurada la base de datos y las variables y parámetros detallados en la Tabla 2. Es importante mencionar que las ventas de ganado no están representadas en el sistema de ecuaciones dado que éstas se realizan en forma de pulso al momento de trasladar los animales de un departamento a otro, como se explicará posteriormente.

Símbolo	Descripción
$T_M(t)$	Número de terneros machos al tiempo t
$T_H(t)$	Número de terneras hembras al tiempo t
$N_O(t)$	Número de novillos al tiempo t
$T_{TO}(t)$	Número de toritos al tiempo t
T_O	Número de toros al tiempo t
$V_Q(t)$	Número de vaquillonas al tiempo t
$V(t)$	Número de vacas al tiempo t
$b_V(t)$	Función maternidad de vacas
m_*	Mortalidad natural de la categoría $*$

Tabla 2: Símbolos utilizados en las ecuaciones.

2.6. Dinámica del estadio Vaca

El flujo de entrada de individuos al estadio Vaca (Fig. 1) se debe a la primera parición de las vaquillonas que fueron destinadas al servicio. Si $V(0)$ es la cantidad de vacas presentes en el departamento al comenzar el año,

$$\rho_M \cdot b(t) \cdot V(0)$$

será la cantidad de nuevas vacas, donde $\rho_M \cdot V(0)$ es la cantidad de hembras que se reponen de acuerdo a $b(t)$ durante el año. Así, el crecimiento anual de la población de vacas será igual a la cantidad de vacas descartadas durante el año.

De esta forma, la siguiente ecuación modela la dinámica de las vacas:

$$\frac{dV}{dt} = \rho_M \cdot b(t) \cdot V(0) - m_V \cdot V(t) \quad (2)$$

2.7. Dinámica del estadio Toro

La situación de los toros es análoga a la de las vacas, con la diferencia de que los nuevos toros estarán distribuidos de acuerdo a $s(t)$, dado que ingresan luego del primer servicio. Por lo tanto, la cantidad de toritos que pasarán a ser toros estará dado por

$$\rho_M \cdot b(t + t_s) \cdot T_O(0)$$

De esta forma, la ecuación que modela la dinámica de los toros está dada por

$$\frac{dT_O}{dt} = \rho_M \cdot b(t + t_s) \cdot T_O(0) - m_{T_O} \cdot T_O(t) \quad (3)$$

2.8. Dinámica del estadio Ternero

Los nuevos terneros provendrán de los nacimientos, con lo cual, deberá contemplarse tanto la distribución de los nacimientos ($b(t)$) como la eficiencia reproductiva (ef). Esta eficiencia podrá variar de acuerdo al departamento en el que estemos trabajando, y tiene en cuenta la posible mortalidad en el parto. Se considerará una relación de sexos 1:1.

A pesar de que tanto las vaquillonas como las vacas contribuyen a la clase ternero, no es necesario considerar los nacimientos de ambas clases dado que la clase Vaca tiene un crecimiento que incluye los nuevos vientres puestos a servicio. Si se considera que las vacas y las vaquillonas tienen la misma distribución de nacimientos y la misma eficiencia reproductiva, los nuevos terneros estarán dados por la expresión

$$\frac{b_V(t)}{2} \cdot V(t)$$

donde, $b_V(t) = ef \cdot b(t)$

En la Figura 3 se tiene un esquema del destete de los terneros. Durante los primeros t_d días del año se destetarán los terneros presentes en el departamento al 1 de enero.

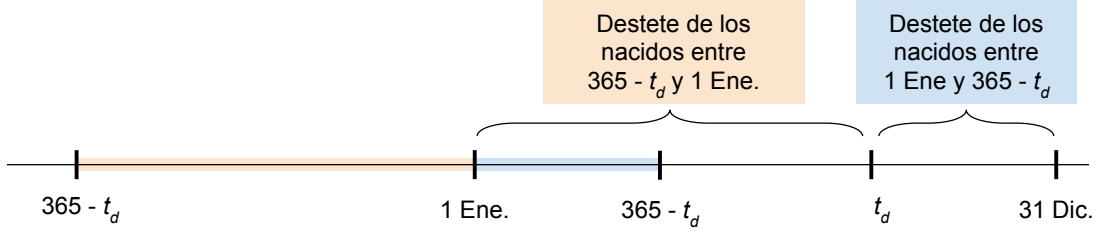


Figura 3: Diagrama de dinámica de destete.

Estos animales representan una proporción p del total de animales que nacieron el año anterior. Podemos concluir entonces que

$$T_M(0) = p \cdot T_{M,ant}$$

donde $T_M(0)$ es el número de terneros al día 1 de enero, $T_{M,ant}$ el número total de terneros que nacieron el año anterior y p es igual a

$$p = \int_{365-t_d}^{365} b(t)dt$$

Así, el destete de los animales $T_M(0)$ se realizará de acuerdo a la función $\frac{d(t)}{p}$, la cual tiene integral 1 en el intervalo $(0, t_d)$ asegurando el destete de todos los animales.

A partir del día t_d comienzan a destetarse los terneros que nacieron en el año actual. Desde el día t_d hasta fin de año se destetarán los terneros nacidos desde el 1 de enero hasta el día $366 - t_d$.

Realizando un razonamiento análogo al anterior, la cantidad de terneros al tiempo t ($T_M(t)$), es una proporción, $p'(t)$, del total de terneros que nacerán el año actual ($T_{M,act}$), es decir, $T_M(t) = p'(t) \cdot T_{M,act}$, donde

$$p'(t) = \int_0^t b(t)dt$$

De esta forma, para cuando $t > t_d$ la cantidad total de terneros que nacerán este año puede ser aproximada por

$$T_{M,act} \cong \frac{T_M(t)}{p'(t)}$$

Así, los destetes de los animales en cuestión se realizará mediante la función $\frac{d(t)}{p'(t)}$.

Es posible que el productor venda algunos terneros durante los primeros t_d días del año. En este caso, estos animales que dejan de estar en el departamento no deben ser tenidos en cuenta al momento del destete. Si $M_{prev}(t)$ son los meses anteriores al tiempo t y $T_{M,i}^\uparrow$ son los terneros que dejaron el departamento durante el mes i , luego

$$T_M(0) - \sum_{i \in M_{ant}(t)} T_{M,i}^\uparrow \quad (4)$$

son los terneros que nacieron durante el año anterior y aún permanecen en el departamento de nacimiento.

Así, el término correspondiente al destete de los terneros está dado por:

$$d(t) \cdot \bar{T}_M(t)$$

donde $d(t) = b(t - t_d)$ and

$$\bar{T}_M(t) = \begin{cases} \frac{T_M(0) - \sum_{i \in M_{\text{ant}}(t)} T_{M,i}^\uparrow}{\int_{365-t_d}^{365} b(t) dt} & \text{si } t \leq t_d \\ \frac{T_M(t)}{\int_0^t b(t) dt} & \text{si } t > t_d \end{cases}$$

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente, la ecuación que modela la dinámica de los terneros está dada por

$$\frac{dT_M}{dt} = \frac{b_V(t)}{2} V(t) - m_{T_M} \cdot T_M(t) - b(t - t_d) \cdot \bar{T}_M(t)$$

2.8.1. Dinámica del estadio Ternera

La dinámica de las terneras es análoga a la dinámica de los terneros. Así, la siguiente ecuación modela la dinámica de esta clase

$$\frac{dT_H}{dt} = \frac{b_V(t)}{2} V(t) - m_{T_H} \cdot T_H(t) - b(t - t_d) \cdot \bar{T}_H(t)$$

2.9. Dinámica del estadio Vaquillona

Una ternera pasa a ser vaquillona luego del destete y permanece en ese estadio hasta la primer parición. Sabemos que la cantidad de terneras que serán vaquillonas estará dado por

$$b(t - t_d) \cdot \tilde{T}_H(t)$$

y que la cantidad de vaquillonas que serán vacas está dado por

$$b(t) \cdot \rho_M \cdot V(0)$$

De esta forma, la dinámica de las vaquillonas estará dada por la ecuación

$$\frac{V_Q}{dt} = b(t - t_d) \cdot \tilde{T}_H(t) - b(t) \cdot \rho_H \cdot V(0) - m_{V_Q} V_Q(t) \quad (5)$$

2.10. Dinámica del estadio Novillo

Sabemos que todos los terneros crecen a novillo excepto una cantidad $\rho_M \cdot T_O(0)$ que serán toritos. Así la cantidad de terneros que serán novillos estará dado por

$$b(t - t_d) \cdot (\tilde{T}_M(t) - \rho_M \cdot T_O(0))$$

De esta forma, la ecuación que determina la dinámica de los novillos será

$$\frac{dN_O}{dt} = b(t - t_d) \cdot (\tilde{T}_M(t) - \rho_M \cdot T_O(0)) - m_{N_O} \cdot N_O(t) \quad (6)$$

2.11. Dinámica del estadio Torito

El crecimiento de ternero a torito estará dado por

$$b(t - t_d) \cdot \rho_M \cdot T_O(0)$$

Una vez que ingresan al servicio, dejarán de ser toritos y serán toros. Así, la cantidad de toritos que serán toros estará dado por

$$b(t + t_s) \cdot \rho_M \cdot T_O(0)$$

Así tendremos que

$$\frac{dT_{TO}}{dt} = b(t - t_d) \cdot \rho_M T_O(0) - b(t + t_s) \cdot \rho_M \cdot T_O(0) - m_{T_{TO}} \cdot T_{TO}(t) \quad (7)$$

2.12. Sistema de Ecuaciones

Por todo lo expuesto en las secciones anteriores, el siguiente sistema de ecuaciones modela la dinámica interna de un rebaño en un sistema cerrado

$$\begin{aligned} \frac{dT_M}{dt} &= \frac{b_V(t)}{2} V(t) - m_{T_M} \cdot T_M(t) - b(t - t_d) \cdot \bar{T}_M(t) \\ \frac{dN_O}{dt} &= b(t - t_d) \cdot (\tilde{T}_M(t) - \rho_M \cdot T_O(0)) - m_{N_O} \cdot N_O(t) \\ \frac{dT_{TO}}{dt} &= b(t - t_d) \cdot \rho_M T_O(0) - b(t + t_s) \cdot \rho_M \cdot T_O(0) - m_{T_{TO}} \cdot T_{TO}(t) \\ \frac{dT_O}{dt} &= \rho_M \cdot b(t + t_s) \cdot T_O(0) - m_{T_O} \cdot T_O(t) \\ \frac{dT_H}{dt} &= \frac{b_V(t)}{2} V(t) - m_{T_H} \cdot T_H(t) - b(t - t_d) \cdot \bar{T}_H(t) \\ \frac{V_Q}{dt} &= b(t - t_d) \cdot \tilde{T}_H(t) - b(t) \cdot \rho_H \cdot V(0) - m_{V_Q} V_Q(t) \\ \frac{dV}{dt} &= \rho_M \cdot b(t) \cdot V(0) - m_V \cdot V(t) \end{aligned} \quad (8)$$

2.12.1. Condiciones de factibilidad

En el sistema de ecuaciones (8) se da por supuesto que todos los departamentos cumplen las siguientes condiciones

$$\begin{aligned} \tilde{T}_M(t) - \rho_M \cdot T_O(0) &\geq 0 \\ T_{TO}(t) - b(t + t_s) \cdot \rho_M \cdot T_O(0) &\geq 0 \\ V_Q(t) - b(t) \cdot \rho_H \cdot V(0) &\geq 0 \end{aligned}$$

Estas condiciones de factibilidad requieren que en los departamentos haya la cantidad suficiente de terneros machos para satisfacer la demanda de toritos, la cantidad suficiente de toritos para satisfacer la demanda de toros y la cantidad suficiente de vaquillonas para satisfacer la demanda de vacas. Si tales condiciones no se cumplieran, podrían ocurrir dos situaciones indeseadas: generarse soluciones negativas, lo que carece de sentido biológico, o que el stock aumente de forma incorrecta.

Esta situación de disponibilidad de animales se cumple, por lo general, en todos los departamentos del país. Sin embargo, para asegurarnos que el incumplimiento de estas condiciones no genere resultados negativos o incoherentes, al momento de implementar computacionalmente las simulaciones se trabajó con soluciones no negativas (haciendo que las mismas fueran cero en caso de aparecer) y calculando el mínimo entre la demanda de animales de reposición y la cantidad disponible.

2.13. Movimiento de animales

Los traslados de animales se realizaron teniendo en cuenta la base de datos disponible. Para esto se utilizaron las tablas DEPTO-DEPTO y DEPTO-FRI construidas para cada uno de los meses. Los movimientos se realizaron de forma simultánea e instantánea el último día de cada mes.

El procedimiento es el siguiente. Dado el stock de animales en un departamento, se suman los animales que ingresaron al departamento durante el mes que acaba de finalizar, y se restan los que salieron durante ese mes. Este procedimiento se realizó para cada una de las clases. De esta forma, a principios del mes siguiente, cada departamento contará con el stock ganadero actualizado.

En la base de datos se puede ver que en la mayoría de los casos, los terneros y terneras se movilizan sin sus madres, es decir, ya destetados. Lo cual no concuerda con la definición de las categorías que tenemos definidas, ya que al momento de realizar el destete dejarían esas clases, para ser considerados toritos, novillos o vaquillonas.

Para tener en cuenta esta situación, en los departamentos de no tránsito, los terneros y terneras que ingresan se contabilizaron como novillos y vaquillonas, respectivamente. Mientras que en los departamentos de tránsito, cada animal que ingresó se contabilizó en su clase original.

Esto se debe a que en los departamentos de tránsito, generalmente hay mercados concentradores que son responsables de recibir ganado y rematarlo. Por lo tanto, los animales ingresan y se venden en la misma clase en la que ingresaron. En estos departamentos, las existencias de ganado son bajas pero, sin embargo, el tránsito de ganado puede ser muy grande.

3. Simulaciones

Las simulaciones se pueden realizar considerando, o sin considerar los movimientos. Esto último es útil para poder proyectar cómo evolucionará la población sin considerar las ventas. En este caso, en la Ec. 4, la suma correspondiente a los animales que salen del departamento debe considerarse igual a cero. Por lo tanto, dada la población ganadera de un departamento, la dinámica de la población puede simularse utilizando el sistema de ecuaciones (8).

Por otro lado, si se quisiera considerar los movimientos habría que hacer lo siguiente. La simulación comienza con las condiciones iniciales del stock ganadero al 1 de enero de 2017 en cada categoría en el departamento donde se realizará la simulación. Con esta información, se simula el modelo correspondiente al sistema de ecuaciones (8) en dicho departamento durante un mes. Al final de la simulación del mes correspondiente, se tendrá el stock actualizado en cada categoría según nacimientos, destete, reemplazo de animales, etc, en dicho departamento. Luego, los movimientos entre departamentos se llevan a cabo teniendo en cuenta las tablas DEPTO-DEPTO y DEPTO-FRI para el mes correspondiente. Por ejemplo, para realizar movimientos de ganado entre enero y febrero, se utilizan las tablas confeccionadas con los movimientos que tuvieron lugar durante el mes de enero.

Después de realizar los movimientos, se tendrá en el departamento en cuestión el stock actualizado al primer día del mes siguiente. Con este stock como condición inicial, la dinámica se simula nuevamente en dicho departamento durante un mes. El proceso de simulación se resume en la Figura 4.

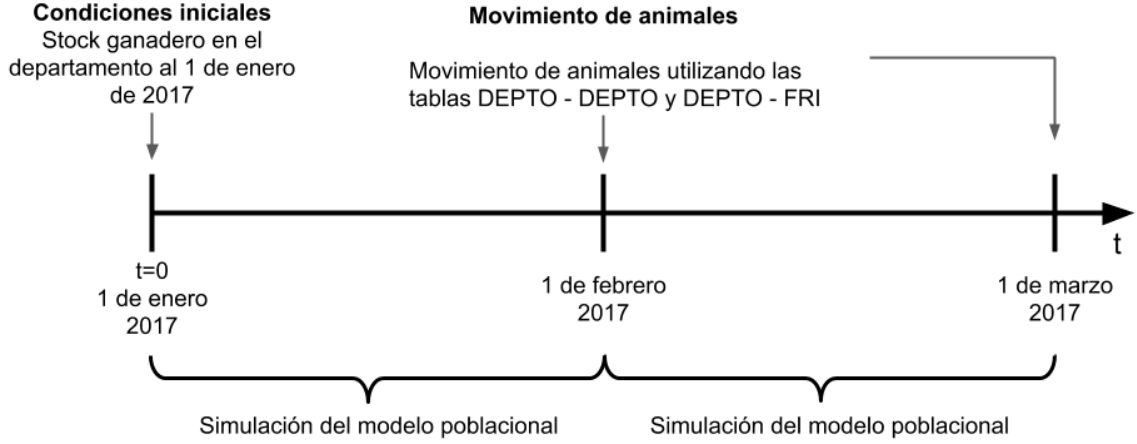


Figura 4: Diagrama de la simulación considerando los movimientos.

4. Resultados

4.1. Simulación de la dinámica en una población cerrada

Considerando el stock ganadero correspondiente a un departamento en particular, se simuló la dinámica de la población durante un año sin considerar los movimientos de los animales. El departamento elegido fue el departamento de Rivadavia, en la provincia de Buenos Aires. El stock de ganado de este departamento al 1 de enero de 2017 se encuentra en la Tabla 3 (a), y los parámetros poblacionales utilizados se pueden ver en la Tabla 3 (b).

Categoría	Número de animales	Parámetro	Valor
Terneros	37177	ef	0.75
Novillos	77335	ρ_M	0.2
Toritos	193	ρ_F	0.09
Toros	2174	t_d	240
Terneras	27375	t_s	270
Vaquillonas	31207	m_{C_F}, m_{C_M}	0.01/365
Vacas	56364	m_*	0.045/365

(a)
(b)

Tabla 3: (a): Stock ganadero al 1 de enero de 2017 en el departamento de Rivadavia, Buenos Aires. (b): Parámetros poblacionales considerados en las simulaciones. m_* hace referencia a la mortalidad de todas las clases, excepto terneros y terneras.

Los parámetros t_d y t_s corresponden a una explotación tradicional. La mortalidad de los terneros y terneras se corresponde con lo publicado en [4], mientras que la mortalidad de las categorías adultas es un valor normal dado que la mortalidad de los animales en estas categorías no es común a campo. Comentarios sobre cómo se estimaron los valores de reposición se pueden encontrar en la siguiente sección. Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 5.

En el gráfico se puede apreciar que la población de vacas crece un 9% anual, siendo el mayor crecimiento en los meses de mayor actividad de parto (julio - septiembre), ya que es el momento en que se produce el mayor crecimiento de vaquillonas a vacas debido al reemplazo de animales. La mayoría de los terneros y terneras presentes a principio de año son destetados entre febrero y abril,

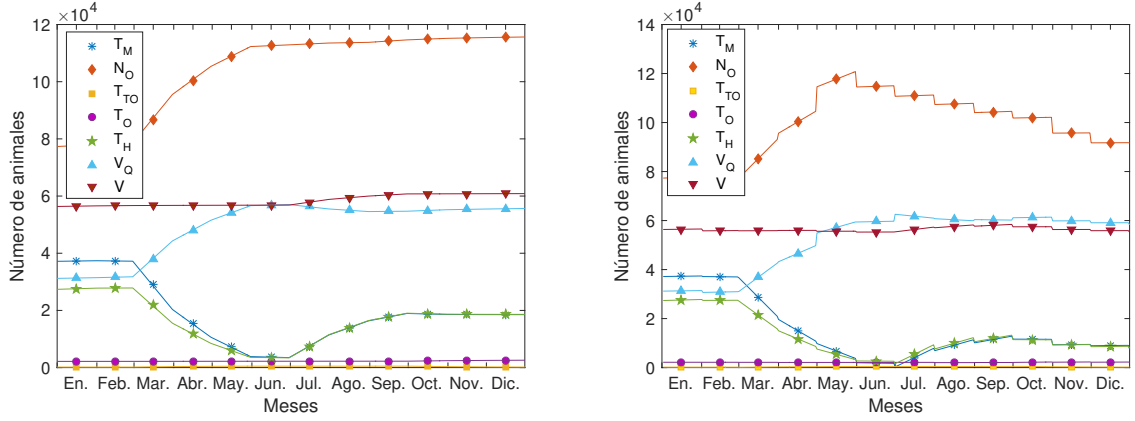


Figura 5: Dinámica poblacional del departamento de Rivadavia, Buenos Aires, utilizando los parámetros de la Tabla 3 considerando (derecha) y sin considerar (izquierda) los movimientos de animales.

por lo tanto, hay una disminución en el número de animales en estas categorías y un aumento en el número de novillos y vaquillonas.

También se puede observar que en el período de mayor actividad de parto, aumenta el número de terneros y terneras. La población de toros, aunque parece ser constante, crece en una proporción del 20 %, debido a los nuevos toros que se incorporan de la categoría torito en el momento del servicio. Los resultados de la simulación concuerdan con la situación observada en a campo.

4.2. Simulación de la dinámica considerando movimientos

Se simuló la dinámica del departamento de Rivadavia considerando los movimientos siguiendo el esquema de la Figura 4. Si se compara la dinámica poblacional de este departamento considerando los movimientos de animales (Fig. 5 derecha) y sin considerarlos (Fig. 5 izquierda), se pueden observar algunas diferencias. Al no considerar los movimientos, la población de novillos crece a lo largo del año, teniendo un gran crecimiento en la época de mayor destete. Por otro lado, si se tienen en cuenta las ventas de animales, esta población crece durante la época de mayor destete y luego comienza a decrecer debido a las ventas.

A su vez, si se consideran los movimientos, la cantidad de vacas al finalizar el año es igual a la cantidad inicial, mientras que en el otro caso esta población crece una proporción igual a ρ_H . Una situación similar se da en el caso de los toros.

Es importante mencionar que los saltos en las curvas se deben a que los movimientos se realizan en forma de pulso al finalizar los meses.

Por otro lado, se simuló la dinámica considerando los movimientos en un departamento donde se realiza mayoritariamente la actividad de cría (Rosario de la Frontera, Provincia de Salta - Fig. 6) utilizando los parámetros de la Tabla 4. Al confrontar los resultados con los obtenidos para el departamento de Rivadavia (donde la actividad principal es el engorde de animales - Fig. 5 derecha), podemos hacer un análisis comparativo de la dinámica poblacional en departamentos con distinta actividad ganadera principal. Para los departamentos de cría, la eficiencia reproductiva se estima en un 85 % [5], mientras que para las regiones donde la cría no es la actividad principal, se puede considerar un valor del 75 %.

Se puede observar que en ambos casos la cantidad de terneros y terneras decrece luego del destete de los mismos. Sin embargo, en Rosario de la Frontera la cantidad inicial de cabezas se recupera para final de año debido a que posee una eficiencia reproductiva mayor, permitiendo la venta de estos terneros y terneras el próximo año luego del destete.

Categoría	Número de animales	Parámetro	Valor
Terneros	37177	ef	0.75
Novillos	77335	ρ_M	0.2
Toritos	193	ρ_F	0.09
Toros	2174	t_d	240
Terneras	27375	t_s	270
Vaquillonas	31207	m_{C_F}, m_{C_M}	0.01/365
Vacas	56364	m_*	0.045/365

(a)
(b)

Tabla 4: (a): Stock ganadero al 1 de enero de 2017 en el departamento de Rosario de la Frontera, Salta. (b): Parámetros poblacionales considerados en las simulaciones. m_* hace referencia a la mortalidad de todas las clases, excepto terneros y terneras.

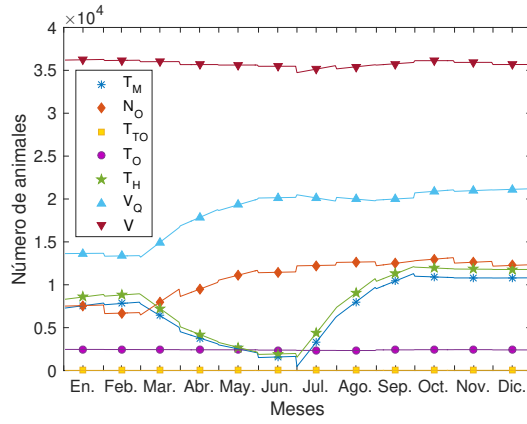


Figura 6: Dinámica poblacional del departamento de Rosario de la Frontera, Salta, utilizando los parámetros de la Tabla 4 considerando los movimientos.

También se observa en los dos departamentos un crecimiento del número de vaquillonas. En el caso de los departamentos de engorde, este crecimiento se debe al hecho de que estas vaquillonas se engordarán para la venta, mientras que en el caso de los departamentos de cría, se pueden utilizar para ponerlas en servicio y aumentar el número de terneros disponibles para la venta.

Los valores de ρ_M y ρ_H para cada uno de los departamentos se pueden calcular a partir de la base de datos. En el caso de los machos, dado un departamento, se calculó el número de toros que fueron vendidos a otros departamentos (tanto sea a un establecimiento ganadero o con destino a faena) y la cantidad de toros que se han comprado a otros departamentos (sin contar los que ingresaban para faena). La diferencia entre estas dos cantidad es la salida neta de toros del departamento. Si la cantidad de toros que ingresaron al departamento es mayor (o igual) que la cantidad de toros que salieron del departamento, significa que el reemplazo de toros se realiza a partir de la compra de animales, y en ese caso el coeficiente de reemplazo (ρ_M) será igual a cero. En otro caso, la salida neta de toros se divide por el stock de toros a comienzo de año, y ese es el valor de ρ_M . En el caso de las hembras el procedimiento es similar pero considerando la población de vacas. Siguiendo este procedimiento es que se calcularon los valores de los parámetros de reposición que se encuentran en las Tablas 3 (b) y 4 (b). Considerando estos valores, la cantidad de toros y vacas al finalizar el año debería ser igual a la cantidad que había al comienzo del mismo.

Si se considera la población total en ambos departamentos, esto es la suma de los animales de

todas las categorías, se puede observar que en el departamento de engorde (Rivadavia) el tamaño poblacional sufre grandes cambios debido a las ventas, mientras en el departamento de cría esas ventas se compensan con los nacimientos. Esto hace que los saltos mensuales sean más pequeños.

5. Discusión y Conclusiones

El modelo presentado en este trabajo permite simular la dinámica de las poblaciones de ganado en los distintos departamentos de Argentina considerando de forma explícita las prácticas de manejo y los movimientos de animales provenientes de la comercialización de los mismos. En este sentido, el modelo presentado es innovador porque incluye no solo la estructura en edades y sexo, que permite conocer la disponibilidad de ganado en cada una de las clases comercialmente interesantes, sino que también registra el intercambio de animales entre departamentos. Esto permite realizar una planificación a futuro de un departamento específico y evaluar cómo mejorar la producción.

El modelo puede ser sencillamente adaptado para simular un sistema metapoblacional, donde las poblaciones sean los departamentos del país. Mediante la utilización del modelo en los diferentes departamentos se puede analizar la evolución de la población en una región de mayor extensión, o en todo el territorio nacional.

Los porcentajes de reposición definidos en la Eq. (1) son útiles siempre y cuando un establecimiento reponga todos los animales con animales propios. Esto no es lo que ocurre en la realidad, sino que los establecimientos muchas veces compran vacas de cría y toros para reproducción. En este caso, los valores de estos parámetros deben ser modificados como se explicó anteriormente.

Se puede ver que el modelo refleja la diferencia entre los departamentos de cría y los departamentos de engorde del país. En este sentido, hay que tener en cuenta que dentro de un departamento hay muchos establecimientos, los cuales no todos tienen las mismas prácticas de manejo. Consideramos que las prácticas de manejo descritas en la sección 2.4 son las prácticas tradicionales y las que se aplican con un nivel de tecnificación medio. Este supuesto puede ser modificado en el caso de tener la información disponible.

Por otro lado, durante la elaboración del modelo se consideró que todas las vacas presentes en el departamento correspondiente fueron puestas en servicio. A pesar de que esta suposición es importante, puede compensarse al reducir la eficiencia reproductiva. A su vez, el modelo no contempla decisiones de manejo que pueda tomar un productor, como por ejemplo, aumentar de la cantidad de vacas para de esta forma tener más vientres en servicio y ampliar su rentabilidad. Este tipo de decisiones pueden ser tenidas en cuenta variando los parámetros relativos a la reposición de animales.

A pesar de las limitaciones encontradas, el modelo presentado podría constituir el puntapié inicial para poder desarrollar modelos de dinámica de enfermedades infecciosas en poblaciones de ganado. La estructura en edades y sexo permitiría simular la dinámica de enfermedades infecciosas que presentan diferentes prevalencias en las distintas clases de edad (por ejemplo, rinotraqueitis bovina infecciosa IBR, brucelosis, etc) [11] y regiones geográficas. Con la inclusión de los movimientos de ganado, es posible obtener un modelo metapoblacional para simular la dinámica de una infección a escala nacional [10] y analizar el efecto de distintas estrategias de control de la infección a escala local o global.

Agradecimientos

Los autores agradecemos al Med. Vet. Marcelo Ballerio, Director de Control de Gestión y Programas Especiales (SENASA) y a su equipo de trabajo por brindarnos la base de datos de stock y movimientos de animales con la que se elaboró el trabajo, y por la disponibilidad para responder consultas. MIS fue becario doctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) durante esta investigación.

Referencias

- [1] AZNAR, M., STEVENSON, M. A., ZARICH, L., AND LEÓN, E. A. Analysis of cattle movements in Argentina, 2005. *Preventive Veterinary Medicine* 98, 2 (2011), 119–127.
- [2] CARRILLO, J. *Manejo de un rodeo de cría*. Emiferio Sur, 1999.
- [3] FAO. *Global livestock environmental assessment model - model description*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010.
- [4] MARESCA, S., QUIROZ GARCÍA, J., PLORUTTI, F., BRUSCA, G., AND FOURQUET, G. Monitoreo de eficiencia reproductiva en rodeos de cría de la cuenca del salado. *Revista Argentina de Producción Animal* 27 (2007), 297–298.
- [5] MARESCA, S., QUIROZ GARCÍA, J. L., AND PIORUTTI, F. *Eficiencia reproductiva en rodeos de cría de la Cuenca del Salado*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2011.
- [6] PISANI CLARO, N., AND MIAZZO, D. *El campo en números*. Fundación Agropecuaria para le Desarrollo de Argentina, 2018.
- [7] PONSSA, E., MACHADO, C., MANGUDO, P., ARROQUI, M., OTTONELLO, A., AND MARCOS, C. Desarrollo de un sistema de la dinámica de rodeo de cría bovina y de los recursos de alimentación para su aplicación a la planificación productiva y económica. *Congreso Argentino de AgroInformática* (2009), 48–60.
- [8] PONSSA, E., RODRÍGUEZ, G., AND SÁNCHEZ ABREGO, D. Relaciones entre la tasa de preñez y la dinámica del rodeo en un sistema de cría bovina. evaluación física y económica. *Anales de la XXXVIII Reunión Anual de la Asociación Argentina de Economía Agraria* 2 (2007), 1–17.
- [9] REARTE, D. La producción de carne en argentina. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria* (2007).
- [10] RILEY, S. Large-scale spatial-transmission models of infectious disease. *Science* 316, 5829 (2007), 1298–1301.
- [11] SCHÄRRER, S., PRESI, P., HATTENDORF, J., CHITNIS, N., REIST, M., AND ZINSSTAG, J. Demographic model of the swiss cattle population for the years 2009-2011 stratified by gender, age and production type. *PloS one* 9, 10 (2014), e109329.
- [12] SCHIARITI, M. *Informe económico mensual. Diciembre 2018*. Cámara de la industria y comercio de carnes y derivados de la República Argentina, 2018.
- [13] VENECIANO, J. H., AND FRASINELLI, C. A. *Cría y recría de bovinos*. INTA San Luís, 2014.