

ALGORITMOS EVOLUTIVOS APLICADOS A SISTEMAS PASTORILES DE PRODUCCIÓN DE LECHE

Gastón Notte

Polo Agroalimentario y Agroindustrial, Centro Universitario de Paysandú
Florida 1051 - Código Postal 60000 - Paysandú - Uruguay
notteg@cup.edu.uy

Martín Pedemonte

Facultad de Ingeniería
Julio Herrera y Reissig 565 - Código Postal 11300 - Montevideo - Uruguay
mpedemon@fing.edu.uy

Héctor Cancela

Facultad de Ingeniería
Julio Herrera y Reissig 565 - Código Postal 11300 - Montevideo - Uruguay
cancela@fing.edu.uy

Pablo Chilibroste

Facultad de Agronomía
Ruta 3 km 363 - Código Postal 60000 - Paysandú - Uruguay
pchili@fagro.edu.uy

RESUMEN

La industria láctea tiene una importancia preponderante en la economía del Uruguay por lo que representa un campo interesante para el desarrollo de modelos y herramientas de informática e investigación operativa para la resolución de problemas de interés práctico en dicha industria. Diariamente quienes operan los sistemas lecheros deben tomar decisiones sobre cómo asignar los recursos alimenticios a una demanda rígida representada por el rodeo lechero. Hasta el momento dicha asignación se realiza en forma intuitiva siguiendo ciertas tradiciones y algunas reglas de manejo. En este trabajo se modela formalmente el problema y se aplican Algoritmos Evolutivos con diferentes representaciones para la resolución del problema de optimización resultante, de modo de realizar una asignación de recursos sobre una base racional y no intuitiva como hasta ahora. Se incluyen resultados comparativos entre las representaciones estudiadas mostrando la eficiencia numérica y computacional obtenida.

PALABRAS CLAVES. Producción Lechera, Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos.

Área Principal. MH

ABSTRACT

The dairy industry plays a significant role in the Uruguayan economy so it represents an interesting field for the development of computer and operations research models and tools to solve problems of practical interest. Every day people who operate dairy systems have to take decisions on how to allocate food resources to a rigid demand that represents the dairy herd. Until now this assignment is done in an intuitive way following certain traditions and some basic management rules. In this paper we model this problem and use evolutionary algorithms with different representations for solving the resulting optimization problem, in order to make the allocation of resources on a rational basis. The paper also includes a comparative analysis between the different representations studied, presenting numerical and computational efficiency results obtained.

KEYWORDS. Dairy Production, Metaheuristics, Evolutionary Algorithms.

Main Area. MH

1. Introducción

La industria ganadera constituye uno de los sectores productivos más importantes de la economía del Uruguay. En particular, la agroindustria láctea representa el 9,3% del Valor Bruto de Producción (VBP) agropecuario, ubicándose en tercer lugar luego de la producción de carne vacuna y arroz. A su vez, esta industria es una de las que más contribuye con las exportaciones nacionales, ya que su aporte de U\$442 millones corresponde al 7% del total. Dichas exportaciones representan el 2% del comercio mundial de productos lácteos [Yavuz (2010), UruguayXXI (2011)].

La superficie del territorio uruguayo dedicada a la lechería está estimada en 849 mil hectáreas, aproximadamente un 6% de la superficie nacional [UruguayXXI (2011)]. La productividad lechera supera los 1.800 millones de litros anuales [Freiría (2011), Yavuz (2010)], siendo Uruguay el mayor productor de leche per cápita de América Latina con aproximadamente 550 litros por habitante. Tiene también un elevado consumo, uno de los más altos del mundo que supera los 200 lts/hab [UruguayXXI (2011)]. El coeficiente de exportación (exportado/disponible) es aproximadamente 61,2% de la producción total, mientras que lo restante está destinado al consumo interno [Freiría (2011)].

Debido a la importancia de la producción lechera para la economía uruguaya y a un proceso de intensificación creciente [Chilibroste (2011)], resulta de interés estudiar problemas vinculados al proceso de producción de leche siguiendo un enfoque propio de la investigación operativa en lugar de los enfoques tradicionales propios de la agronomía. En particular, en este trabajo se estudia un problema de asignación de recursos alimenticios al ganado (rodeo) lechero.

El problema de asignación de recursos alimenticios al rodeo lechero consiste en determinar cómo asignar los recursos alimenticios disponibles (que pueden ser finitos e infinitos) a partir de la demanda rígida del rodeo lechero con el objetivo de maximizar la producción lechera. En los últimos años este proceso de asignación de recursos se ha complejizado como consecuencia de la intensificación de los sistemas lecheros. Hasta el momento, este tipo de asignaciones alimenticias se suelen realizar en base a la experiencia y a la intuición (e incluso en ciertos casos en base a tradiciones), solamente siguiendo algunas reglas de manejo considerando la eco-fisiología animal.

Algunos trabajos previos se han enfocado en la definición de sistemas de valoración de necesidades y de estimación del aporte energético de los alimentos para el ganado vacuno y su posterior impacto en la producción de leche [Moe (1972), Dean (1972), National Research Council (2001)]. Sin embargo, de acuerdo a nuestro conocimiento no existen antecedentes directos que resuelvan la asignación de recursos alimenticios disponibles para el rodeo lechero.

Las principales contribuciones de este trabajo son el estudio del problema de asignación de recursos alimenticios al rodeo lechero, y su modelado como un problema de optimización combinatoria, así como el diseño de dos algoritmos evolutivos basados en distintas representaciones para su resolución. La evaluación experimental realizada a partir de escenarios especialmente diseñados para este trabajo permite analizar comparativamente la performance y la calidad de los resultados obtenidos por ambas representaciones. El resto del artículo se organiza del siguiente modo. La sección 2 presenta el problema estudiado y su modelado como un problema de optimización. La sección 3 describe el algoritmo evolutivo utilizado para su resolución, mientras que los resultados experimentales se presentan en la sección 4. Por último, la sección 5 ofrece las conclusiones y propuestas de trabajo futuro.

2. Planteo del problema

Los sistemas de producción de leche en Uruguay se definen como *Sistemas de Base Pastoril con Suplementación* [Mattiauda (2011)].

El concepto de base pastoril está determinado por la producción de forraje que es pastoreado directamente por los animales u ocasionalmente (cuando hay excesos) cosechados mecánicamente en forma de ensilaje o heno. Un primer aspecto a resaltar es que conviven en un mismo sistema diferentes alternativas forrajeras, que a su vez tienen una cierta distribución espacial en unidades identificadas como potreros.

El concepto de suplementación está definido por la utilización del forraje conservado y concentrados. El forraje conservado generalmente es producido en el mismo sistema y constituye una cantidad finita y conocida de alimento. Algunos ejemplos de forraje conservado son los ensilajes de maíz, sorgo y pasturas y los fardos de distintos materiales. Los concentrados incluyen granos y una amplia gama de subproductos de la industria de alimentos, tanto nacionales como importados (como por ejemplo: los afrechillos de trigo y arroz, los expellers de girasol y soja, los subproductos de maíz, etc.).

Los componentes recién descritos (forraje para cosecha directa, forrajes conservados y concentrados) constituyen la estructura de oferta de alimentos del sistema. La oferta de alimentos en un momento dado queda definida por las pasturas y forrajes conservados disponibles más los concentrados que se pueden adquirir en el mercado. Los concentrados son los únicos alimentos que serán considerados como un recurso infinito, ya que los mismos pueden conseguirse fácilmente en el mercado. La única limitante que tienen son los altos costos en comparación a los forrajes. Información complementaria sobre la estructura de costos y resultados en la lechería uruguaya fueron presentados previamente por Chilibroste (2011).

Otro componente relevante de los sistemas pastoriles de producción de leche es la estructura de demanda de alimentos. La demanda de alimentos en un momento dado queda definida por la cantidad de animales en ordeño y su potencial de producción de leche (y por tanto su consumo de alimentos). Adicionalmente, en Uruguay las vacas son ordeñadas dos veces al día lo que implica el traslado de los animales desde el lugar donde se encuentren al momento de la realización del ordeño hasta la sala de extracción de leche, y el movimiento posterior desde allí hasta su nuevo destino (al mismo potrero pero en un lugar diferente, a un potrero diferente y/o a un lugar cercano al tambo donde recibirán alguno de los suplementos descritos).

Diariamente quien opera los sistemas lecheros debe tomar decisiones sobre como asignar recursos alimenticios finitos e infinitos a una demanda rígida representada por el rodeo lechero. Hasta el momento esta asignación diaria de recursos se realiza en forma intuitiva siguiendo algunas reglas de manejo con base en la eco-fisiología animal y en ciertos casos en base a tradiciones. En los últimos años este proceso de asignación de recursos se ha complejizado como consecuencia de la intensificación de los sistemas lecheros [Mattiauda (2011)].

El objetivo principal de este trabajo es aplicar un modelo que permita asignar recursos sobre una base racional y no intuitiva como se hace en el presente. A partir de los componentes anteriormente mencionados y las ecuaciones de predicción del NRC 2001 [Correa (2001)], es posible formular el problema de asignación de recursos alimenticios como un problema de optimización combinatoria. El modelo permite agrupar y trasladar ganado a un conjunto de zonas conocidas de campo (potreros y plazas de alimentación ubicadas en el establo). A partir de la actividad de cada potrero o del tipo de alimento ofrecido en las plazas, y dependiendo de las diferentes condiciones que presenta cada animal para producir leche, se busca una asignación de recursos que maximice dicha producción (minimizando los costos asociados). Resulta fundamental resolver dichos traslados o distribuciones para una cierta cantidad de días, evitando de esta forma tener que hacer consultas diarias. Considerando esto y que las vacas son ordeñadas dos veces por día, la solución debe brindar un esquema que represente qué distribución de animales hay que realizar para cada día y cada ordeño.

2.1 Formulación matemática del problema

El problema que se quiere abordar en este trabajo queda definido por dos partes bien diferenciadas, el modelo elaborado para la agrupación y distribución de ganado (o modelo de asignación de recursos), y un modelo de producción de leche definido por las ecuaciones de predicción reportadas en NRC 2001 [Correa (2001)], el cual es utilizado en el modelo elaborado.

Una primera aproximación al problema es considerar la distribución y el traslado de ganado para un único ordeño. En esta primera aproximación, cada vaca puede ser asignada independientemente a una zona del campo. Teniendo en cuenta que la aplicación del modelo para una única instancia de ordeño busca maximizar la producción de leche real (PLR) para

todas las vacas v_i sujeto a la disponibilidad de recursos alimenticios, es posible derivar la formulación matemática que se presenta en la Ecuación 1. Cada animal tiene asociado un consumo máximo de alimento en kg de materia seca (MS) por día, al que se llama consumo potencial (*ConsumoMS*). Este consumo potencial es el parámetro que se utiliza para limitar el consumo máximo de cada animal. Para este problema, no se permite una solución en la que una vaca consuma más kg de MS que el *ConsumoMS*. Cada v_i , con $i = 1..M$, se corresponde con una identificación asignada arbitrariamente para cada vaca del rodeo (M es la cantidad de vacas consideradas). A su vez, la función PLR (definida en función del *ConsumoReal(i)*) es tomada del modelo NRC 2001 y es presentada en la Ecuación 9 debiéndose instanciar con los parámetros de cada animal.

$$\max \sum_i PLR(ConsumoReal(i))$$

sa :

$$\sum_{i/ZonaAsignada_i=z} ConsumoReal(i) \leq cantidad\ MS\ disponible(z) \quad (1)$$

$$ConsumoReal(i) \leq ConsumoMS(i) \quad i = 1..M$$

$$ZonaAsignada(i) \in Zonas \quad i = 1..M$$

Las variables de decisión son *ConsumoReal* y *ZonaAsignada*.

Una aproximación más realista al problema debe considerar dos ordeñes diarios durante varios días. Para ello se debe cambiar las variables de decisión de manera de poder representar la asignación de zona y consumo de cada vaca para cada ordeño (cantidad total $2 * cantDias$), siendo z una zona a considerar. La formulación matemática resultante se presenta en la Ecuación 2.

$$\max \sum_{j=1}^{cantDias*2} \sum_{i=1}^V PLR(ConsumoReal(j,i))$$

sa :

$$\sum_j \sum_{i/ZonaAsignada(j,i)=z} ConsumoReal(j,i) \leq cantidad\ MS\ disponible(z) \quad (2)$$

$$ConsumoReal(j,i) \leq ConsumoMS(i) \quad i = 1..M \text{ y } j = 1..2 * cantDias$$

$$ZonaAsignada(j,i) \in Zonas \quad i = 1..M \text{ y } j = 1..2 * cantDias$$

Finalmente, para incorporar un enfoque más realista es posible considerar el agrupamiento de vacas de características similares (misma edad, peso similar, etc.) y dejar de considerar a cada vaca en forma individual. Para ello se debe agregar una nueva restricción para que en cada ordeño se asigne la totalidad del ganado. La formulación resultante se presenta en la Ecuación 3.

$$\max \sum_{j=1}^{2*cantDias} \sum_z PLR(ConsumoReal(j,z)) * cantidadVacas(j,z)$$

sa :

$$\sum_j ConsumoReal(j,z) * cantidadVacas(j,z) \leq cantidad\ MS\ disponible(z) \quad (3)$$

$$ConsumoReal(j,z) \leq ConsumoMS$$

$$\sum_z cantidadVacas(j,z) = M \quad j = 1..2 * cantDias$$

El modelo de producción de leche queda definido por la oferta y demanda de alimentos. La oferta de alimentos está compuesta por pasturas, forraje conservado y suplemento. Las pasturas se definen como actividades de los potreros, cuyos atributos principales son la distancia a la sala de ordeño y los tipos de pasturas (diferenciados principalmente por la cantidad de forraje disponible, su densidad energética y costo asociado).

En cuanto al forraje conservado, existen distintos tipos que se diferencian por su densidad energética, disponibilidad y costos. El suplemento, al igual que el forraje conservado, se distingue por la densidad energética y costos, pero en este caso no se tendrá en cuenta la cantidad disponible ya que estos pueden conseguirse prácticamente en forma ilimitada en el mercado alimenticio. La demanda de alimentos queda determinada por la descripción de cada animal, los cuales están definidos por su peso vivo (PV), potencial genético (PotG), días o semana de lactancia (dl o SL), número de lactancia (NL), y porcentaje de contenido de sólidos en leche (G:grasa y P:proteína). En este trabajo solamente se considera distintos valores para el peso vivo y el potencial genético, dejando fijos los restantes atributos.

Para calcular la producción de leche real (PLR) de una vaca es necesario calcular la cantidad de energía disponible del animal y su equivalente en litros de leche. La energía disponible (ED) se calcula como la cantidad de energía adquirida a través de los alimentos (EA) menos los requerimientos energéticos. Los requerimientos energéticos son de tipo basal (RB), es decir el consumo de energía necesario para que el animal siga vivo, y de traslados (RT), es decir la cantidad de energía consumida al trasladarse desde el potrero a la sala de ordeño y desde esa sala a su próximo destino. Las ecuaciones utilizadas para obtener la producción de leche real se obtienen a partir del Modelo NRC 2001 [Correa (2001)].

El cálculo para conocer la energía disponible se presenta en la Ecuación 4. La energía adquirida se puede calcular como la cantidad de kilogramos de MS consumidos multiplicados por el valor energético que brinda el alimento en cuestión, como se muestra en la Ecuación 5. Por otro lado, el requerimiento basal es calculado a partir del peso vivo (PV) del animal, como se muestra en la Ecuación 6. Finalmente, el requerimiento de traslado se obtiene a partir de la distancia que debe recorrer cada animal, el número de viajes, y su peso vivo, como se presenta en la Ecuación 7.

$$ED = EA - (RB + RT) \quad (4)$$

$$EA = MS \text{ Consumida en Kg} * \text{Valor Energético} \quad (5)$$

$$RB = 0.08 * PV^{0.75} \quad (6)$$

$$RT = \text{Distancia en Km} * \text{Nro Viajes} * 0.00045 * PV \quad (7)$$

Los litros de leche producidos se calculan a partir de dividir la energía disponible entre la energía equivalente por litro (ENI), como se muestra en las Ecuaciones 8 y 9.

$$ENI = 0.0929 * \text{PorcentajeDeGrasa} + 0.0547 * \text{PorcentajeDeProteinas} + 0.192 \quad (8)$$

$$PLR = ED / ENI \quad (9)$$

Finalmente, el consumo potencial en kilogramos de materia seca puede calcularse como se muestra en la Ecuación 10.

$$\text{ConsumoMS (kg / d)} = (0,372 \times PL + 0,0968 \times PV^{0.75}) \times (1 - e^{-0,192 \times (SL + 3,67)}) \quad (10)$$

Es conveniente señalar que en las formulaciones planteadas existen algunos aspectos que no fueron considerados y que pueden ser considerados en un futuro, como por ejemplo: el costo económico de los alimentos y del litro de leche, así como el efecto del consumo de la pastura en su posterior crecimiento (lo que sería un costo asociado a la decisión tomada). También se asume que el balance de energía en el cuerpo es cero, de lo contrario se debería agregar funciones para la ganancia o pérdida de peso vivo.

3. Resolución mediante un Algoritmo Evolutivo

La resolución de problemas de optimización al considerar instancias de gran tamaño suele imponer desafíos que no pueden ser abordados con los enfoques exactos tradicionales. En este contexto, varias metaheurísticas se han aplicado para obtener soluciones aproximadas de buena calidad en tiempos razonables. Entre ellas, los algoritmos genéticos (AG) [Goldberg

(1989)] se han mostrado como métodos flexibles y robustos para la solución de los complejos problemas de optimización en forma eficiente. Por estos motivos se tomó la decisión de utilizar este tipo de algoritmos.

Para implementar un AG para la resolución del problema se requiere definir una codificación (representación) adecuada. Teniendo en cuenta la necesidad de que la codificación permita representar una distribución de animales para cada ordeño en varios días, se trabajó con una codificación basada en asignarle a cada animal una zona de campo para cada ordeño durante los días que sean necesarios (*codificación por individuo*, basada en la segunda formulación del problema) y con otra codificación que asigna grupos de animales a cada zona del campo para cada ordeño (*codificación por grupo*, basada en la tercera formulación del problema).

Las implementaciones de ambos AG fueron realizadas en C++ utilizando la biblioteca GALib [Wall (1999)]. GALib brinda diferentes componentes que permiten implementar una amplia gama de algoritmos genéticos contando con una amplia gama de representaciones y operadores provistos. Esta biblioteca también permite personalizar los algoritmos mediante la extensión de sus clases, de forma de poder incorporar nuevas representaciones y nuevos operadores evolutivos.

3.1 Codificación por individuo

La codificación por individuo consiste en una matriz con “días*2” filas (recordar que se realizan 2 ordeños por día) y tantas columnas como animales se consideren, como se muestra en la Figura 1. El valor de cada celda representa la zona o potrero a la que irá cada animal.

La función objetivo asociada a esta codificación es calculada a partir de la energía que se adquiere por consumir alimentos, restándole los costos asociados a los traslados. Los pasos para el cálculo de dicha función son:

- 1) *obtener la cantidad de vacas por cada zona*
- 2) *para cada elemento (vaca) del vector*
calcular alimento que corresponde según zona
calcular energía adquirida y acumular
calcular costo traslados y acumular
- 3) *fitness = energía adquirida – costo traslados*

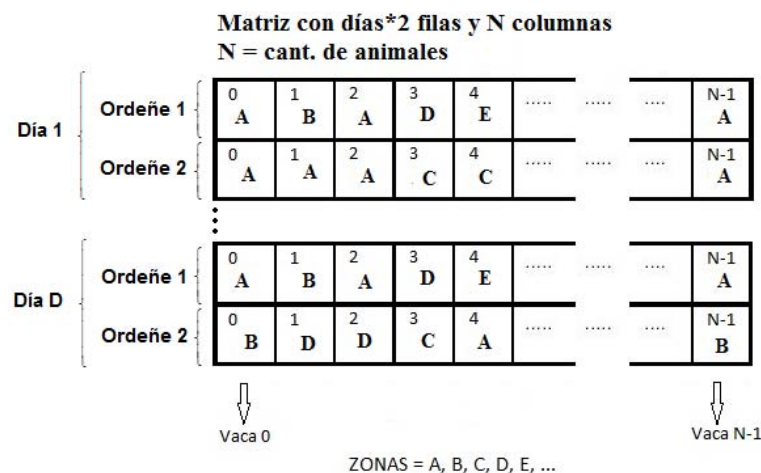


Figura 1 - Ejemplo de codificación por individuo para N vacas y D días

Para la codificación por individuo se trabajó con un algoritmo genético que utiliza como operadores el cruzamiento de dos puntos (two-point crossover) y la mutación de intercambio de dos posiciones (swap mutator).

3.2 Codificación por grupo

La codificación por grupo también es una matriz con “días*2” filas, pero tiene tantas

columnas como zonas de campo se consideren, como se muestra en la Figura 2. Cada casillero tiene un valor que representa la cantidad de animales que se debe trasladar a cada zona en el ordeño correspondiente. Para este caso es importante considerar que la suma de los valores de las celdas de cada fila debe ser igual a la cantidad de animales con la que se está trabajando.

Matriz con días*2 filas y N columnas
N = cant. zonas de campo
M = cant. vacas

		zonas de campo					
		A	B	.....	.....	.....
Día 1	Ordeño 1	30	85	.....	.....	.....	suma = M
	Ordeño 2	0	12	.....	.....	.....	suma = M
Día D	Ordeño 1	117	23	.....	.....	.....	suma = M
	Ordeño 2	158	3	.....	.....	.....	suma = M

Figura 2 - Ejemplo de codificación por grupo para M vacas, N zonas y D días

La función objetivo de esta codificación varía con respecto a la utilizada en la codificación por individuo. Si bien el objetivo es el mismo (obtener la suma de producción de leche de todas las vacas), la implementación es diferente. Los pasos para el cálculo de dicha función son:

- 1) *obtener la cantidad de vacas por cada zona*
- 2) *para cada zona*
 - calcular alimento que corresponde según zona*
 - calcular energía adquirida (de todas las vacas de ese tipo en esa zona) y acumular*
 - calcular costo traslados (de todas las vacas de ese tipo en esa zona) y acumular*
- 3) *fitness = energía adquirida – costo traslados*

A diferencia de la codificación por individuo, en la que se pudo aprovechar operadores de mutación y cruzamiento ya implementados en GALib, para la codificación por grupo hubo que definir e implementar nuevos operadores. En el operador de mutación se seleccionan aleatoriamente dos celdas del individuo y se intercambian sus valores. Si las celdas obtenidas pertenecen a la misma fila de la matriz no se viola la restricción de que la totalidad de las vacas esté asignada a las zonas. En caso contrario se aplica una corrección al individuo resultante.

El operador de cruzamiento utilizado es similar al cruzamiento de un punto (one point crossover), pero también involucra realizar una corrección en los nuevos individuos generados si se viola la misma restricción.

La operación de corrección modifica a los individuos cuando la suma de los valores de las celdas de cada fila es distinta a la cantidad de vacas con las que se está trabajando. Cuando una fila no cumple con la condición, se calcula la diferencia entre el valor correcto y el valor de la fila y se realiza un ajuste a partir de dicha diferencia. Este ajuste se realiza sumando o restando (según el signo de la diferencia) unidades en forma aleatoria a celdas seleccionadas aleatoriamente de la fila correspondiente.

4. Evaluación experimental

Este trabajo, por tratarse de la primera aproximación a este problema de optimización, presenta un enfoque preliminar centrado en estudiar de qué forma escala el algoritmo genético al trabajar con las dos codificaciones propuestas. Por este motivo, se diseñaron instancias de prueba

ficticias que resultaran sencillas de analizar, dejando para una etapa posterior el ajuste al modelo agronómico que involucre instancias de prueba del mundo real.

Para generar las instancias de prueba se partió de una instancia pequeña con solamente cuatro vacas, de modo que fuera posible obtener el valor óptimo (55 ltrs/ordeño) mediante una búsqueda exhaustiva. Las instancias utilizadas para la evaluación experimental se construyeron a partir de la instancia pequeña multiplicando por sucesivos factores de 10 la cantidad de animales y los recursos. Como el valor óptimo de la instancia pequeña es 55 ltrs/ordeño y los valores de los parámetros se multiplicaron por factores de 10, simplemente replicando esa misma cantidad de veces una solución óptima de la instancia pequeña se obtiene una solución factible (aunque no necesariamente óptima) del problema mayor. Por lo tanto, dada la linealidad de la función objetivo, el valor de esas soluciones factibles es de 55×10^x (donde x es la potencia de 10 utilizada); siendo cotas inferiores del valor óptimo de las instancias resultantes. Estos valores servirán de valor de aspiración para la calidad de las soluciones obtenidas por los algoritmos evolutivos desarrollados, si bien al ser cotas inferiores del valor óptimo de un problema de maximización, es posible que el mejor valor de alguna instancia supere el valor de referencia. Más información de las instancias utilizadas en la parte experimental puede consultarse en el Anexo I.

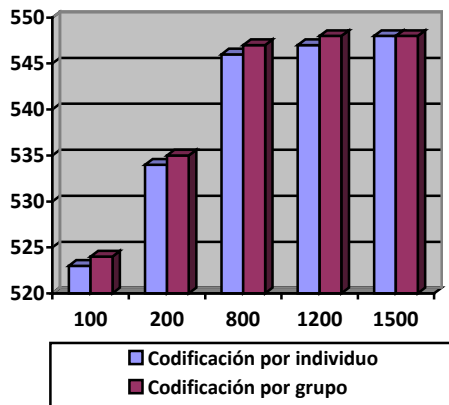
Los AG para ambas codificaciones fueron ejecutados con probabilidad de mutación 0.3, probabilidad de cruzamiento 0.5 y tamaño de la población 400 (valores determinados a partir de un proceso previo de calibración de parámetros). La plataforma de ejecución es una máquina virtual que corre sobre una PC con un procesador AMD Turion 64x2 de 2.0Ghz, con 4GB de memoria RAM. El sistema operativo de la máquina virtual es Windows XP, que utiliza el 50% del procesador de la máquina física y tiene asignada 1.5GB de su memoria RAM. Se realizaron 30 ejecuciones independientes para cada una de las instancias y las codificaciones estudiadas. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos al trabajar con codificación por individuo para un rodeo de 40 vacas, mientras que en la Tabla 2 se presenta los resultados cuando se usa codificación por grupo. La cota inferior del valor óptimo para este escenario es 550 ltrs/ordeño. En las Gráficas 1 y 2 se presenta la mejor solución obtenida en función de la generación y el tiempo de ejecución promedio, respectivamente. Los resultados obtenidos muestran que en ambas codificaciones se obtienen valores muy cercanos al valor de referencia (cota inferior del óptimo), y esto se puede apreciar claramente en la Gráfica 1. Sin embargo, si bien en ambas codificaciones los tiempos de ejecución son cortos, la Gráfica 2 muestra que los tiempos de la codificación por individuo son mayores a los obtenidos en la codificación por grupo.

Generaciones	Mejor solución	Tiempo promedio (s)
100	523	0,015
200	534	0,046
800	546	0,7
1200	547	1,1
1500	548	1,3

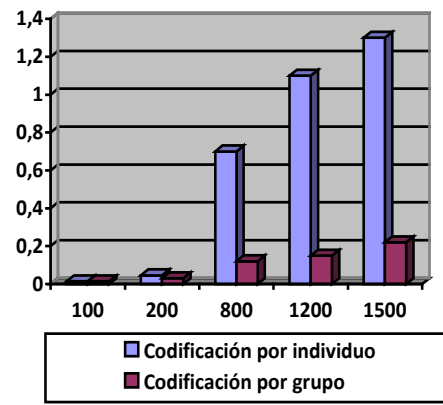
Tabla 1: Por Individuos, escenario con 40 vacas

Generaciones	Mejor solución	Tiempo promedio (s)
100	524	0,015
200	535	0,03
800	547	0,12
1200	548	0,15
1500	548	0,22

Tabla 2: Por Grupos, escenario con 40 vacas



Gráfica 1: Mejor solución por iteración en escenario de 40 vacas



Gráfica 2: Tiempo de ejecución por iteración en escenario de 40 vacas

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para la codificación por individuo al trabajar con 400 vacas, mientras que en la Tabla 4 se muestran los resultados cuando se usa codificación por grupo. La cota inferior del valor óptimo para este escenario es 5500 ltrs/ordeño. En la Tabla 3 se puede apreciar que aún permitiendo que el AG evolucione durante varios miles de generaciones, el mejor valor obtenido para la codificación por individuo no logra aproximarse a la cota inferior del valor óptimo. También puede apreciarse que los tiempos de ejecución se empiezan a elevar considerablemente con respecto a las pruebas en el escenario anterior. En la Tabla 4 se puede observar que el AG con codificación por grupo logra en poco tiempo encontrar soluciones satisfactorias. En las Gráficas 3 y 4 se presenta la mejor solución obtenida en función de la generación y el tiempo de ejecución promedio para ambas codificaciones, respectivamente. Las gráficas muestran claramente que para este escenario la codificación por grupo es más eficiente tanto en lo numérico como en lo computacional.

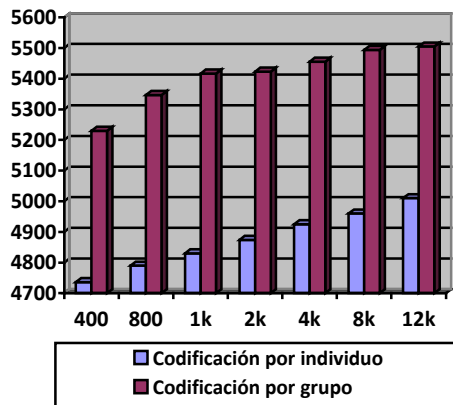
En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos para la codificación por individuo al trabajar con 4000 vacas, mientras que en la Tabla 6 se presenta los resultados cuando se trabaja con codificación por grupo. Como referencia, se tiene una cota inferior del valor óptimo para este escenario, de valor 55000 ltrs/ordeño. En la Tabla 5 se puede apreciar que el mejor valor obtenido por la codificación por individuo está muy por debajo del valor de referencia y que el tiempo de ejecución correspondiente es relativamente alto. En la Tabla 6 se puede observar que

Generaciones	Mejor solución	Tiempo promedio (s)
400	4736	0,9
800	4790	3,5
1000	4830	9,3
2000	4874	18,6
4000	4925	38,4
8000	4960	80
12000	5010	114

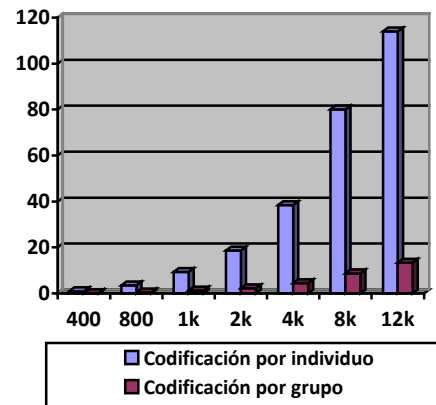
Tabla 3: Por Individuos, escenario con 400 vacas

Generaciones	Mejor solución	Tiempo promedio (s)
400	5230	0,1
800	5347	0,4
1000	5417	1,2
2000	5423	2,2
4000	5455	4,5
8000	5494	8,7
12000	5505	13,4

Tabla 4: Por Grupos, escenario con 400 vacas



Gráfica 3: Mejor solución por iteración en escenario de 400 vacas



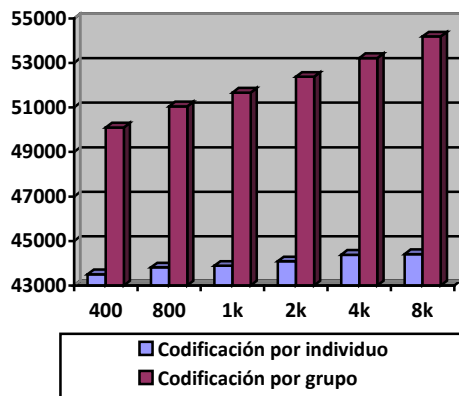
Gráfica 4: Tiempo de ejecución por iteración en escenario de 400 vacas

Generaciones	Mejor solución	Tiempo promedio (s)
400	43500	8,3
800	43815	31
1000	43885	78
2000	44085	150
4000	44385	300
8000	44410	605

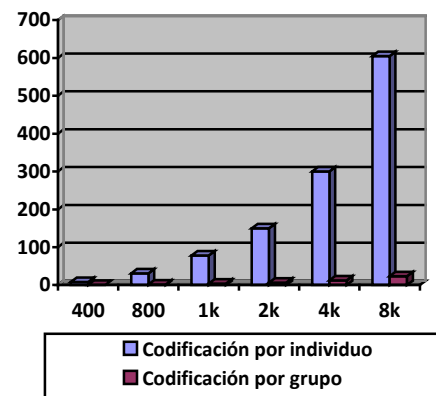
Tabla 5: Por Individuos, escenario de 4000 vacas

Generaciones	Mejor solución	Tiempo promedio (s)
400	50095	0,4
800	51048	1,4
1000	51660	3,4
2000	52378	6,7
4000	53215	12,3
8000	54186	23,5

Tabla 6: Por Grupos, escenario con 4000 vacas



Gráfica 5: Mejor solución por iteración en escenario de 4000 vacas



Gráfica 6: Tiempo de ejecución por iteración en escenario de 4000 vacas

la codificación por grupo obtiene soluciones de muy buena calidad en poco tiempo de ejecución. En las Gráficas 5 y 6 se muestra la comparación entre ambas codificaciones. Las gráficas vuelven a mostrar las notorias diferencias en la eficiencia numérica y computacional de ambas codificaciones.

Los resultados obtenidos permiten comprobar claramente que la codificación por grupo presenta tiempos de ejecución significativamente menores que la codificación por individuo. Este hecho está justificado ya que al trabajar por grupos se trabaja con una granularidad mayor que cuando se utiliza una codificación por individuos. En contraposición, la codificación por individuos permite un mayor grado de expresividad que la codificación por grupo. Un resultado

interesante del presente trabajo es que la codificación por grupos permitió encontrar mejores soluciones que la codificación por individuos. Este hecho que puede resultar sorprendente parece deberse a que los operadores evolutivos utilizados al trabajar por grupos tienen más inteligencia que los operadores usados al trabajar con individuos que son bastante simples.

5. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se estudió un problema de asignación de recursos alimenticios al rodeo lechero, proponiéndose tres modelos como problemas de optimización. Se diseñaron dos algoritmos genéticos con distinta representación que fueron evaluados en forma comparativa en cuanto a la calidad de las soluciones que obtienen y su performance.

Los resultados obtenidos para ambas codificaciones permiten afirmar que la codificación por grupo es notoriamente mejor, no solamente en lo que respecta a los tiempos de ejecución, sino que también existe una gran diferencia en la calidad de las soluciones obtenidas al considerarse una cantidad de generaciones idénticas. Otra conclusión que puede extraerse de este trabajo es la gran flexibilidad que muestran los Algoritmos Genéticos para ser aplicados para la resolución de problemas similares al planteado en este trabajo. Como queda evidenciado en este trabajo, resulta sumamente sencillo adaptar este tipo de algoritmos de modo de trabajar con distintas representaciones y distintos operadores.

Las líneas de trabajo futuro identificadas como interesantes son: la extensión del modelo propuesto, la experimentación con instancias del mundo real y la utilización de otras metaheurísticas para la resolución del problema. En primer lugar, se planea continuar ampliando el modelo lechero presentado en la definición del problema. Actualmente, se está trabajando en la incorporación de dos enfoques complementarios, uno que busca maximizar la energía adquirida por el ganado y otro que busca maximizar las ganancias económicas. En segundo lugar, si bien en este trabajo se realizó una validación de los algoritmos propuestos, las instancias de prueba resueltas fueron generadas artificialmente. Resulta fundamental para la aplicabilidad de este trabajo obtener instancias del problema del mundo real con el fin de terminar de validar los algoritmos propuestos. Finalmente, puede resultar interesante experimentar sobre el mismo problema con otras técnicas metaheurísticas, como las búsquedas locales, la búsqueda Tabú, etc, y utilizar métodos de resolución basados en programación matemática, que pueden suministrar en instancias pequeñas valores exactos, y para instancias mayores, permitir obtener cotas superiores e inferiores de los óptimos.

6. Referencias

Chilibroste, P., International Farm Comparisson Network, 2011, *IFCN Dairy Report 2011*, IFCN Dairy Research Center, Kiel

Correa, H., El modelo NRC-2001. *Nutrición Animal*, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, Reporte técnico 2001 http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_agronomia/Modelo_NRC_2001.pdf [26/05/2012].

Dean, G.W., Carter, H. O., Wagstaff, H. R., Olayide, S. O., Ronning, M. y Bath, D. L., Production Functions and Linear Programming Models for Dairy Cattle Feeding. *Monograph 31, Giannini Foundation of Agricultural Economics*, University of California, December, 1972.

Freiria, G. y Hernández, A., Estadísticas del sector lácteo 2010, *Estadísticas Agropecuarias (DIEA)*, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Reporte, Noviembre 2011, Serie de Trabajos Especiales, N°304. <http://www.mgap.gub.uy> [26/05/2012].

Goldberg, D., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.

Mattiauda, D., Chilibroste, P. y Soca, P., Balance entre oferta y demanda de nutrientes en sistemas pastoriles de producción de leche: potencial de intervención al inicio de la lactancia, *XV Congreso Latinoamericano de Buiatría*, XXXIX Jornadas Uruguayas de Buiatría, Paysandú, 2011.

Moe, P. W. y Tyrrell, H. F., Net energy value of feeds for lactation. *Journal of Dairy Science*, vol. 55, no. 7, pp. 945– 958, 1972.

National Research Council., The nutrient requirement of dairy cattle, National Academy Press , seventh edition, 2001.

UruguayXXI., Oportunidades de inversión en Uruguay, *Sector lácteo*, Uruguay XXI. Agencia de promoción de inversiones y exportaciones de Uruguay, Reporte, Noviembre 2011. <http://www.uruguayxxi.gub.uy> [26/05/2012].

Wall, M., Galib, 1999. <http://lancet.mit.edu/ga/> [26/05/2012].

Yavuz, D., Pacheco, M. y Silva, M. E., Poder de mercado en la industria láctea uruguaya. *Tesis de Licenciatura en Economía*, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2010.

Anexo I: Generación de los escenarios de prueba

Cada instancia queda definida por la cantidad de animales con la que se trabaja, la cantidad de zonas, la demanda alimenticia de cada animal, la cantidad de alimento disponible en cada zona y la función de producción de leche. Los datos que varían y a partir de los cuales se diferencian las instancias son la cantidad de animales, la cantidad de alimento en las zonas y la demanda alimenticia de las vacas. Se mantiene fija la cantidad de zonas (3) y se utilizó siempre la siguiente función de producción de leche:

si alimentoPorVaca \geq demanda [v] siendo v una vaca

entonces produccionLeche = demanda [v] / 2

sino produccionLeche = alimentoPorVaca / 2

A continuación se presenta la Tabla 7 que muestra los valores ficticios utilizados para crear cada instancia.

	Cantidad de vacas	Cantidad de alimento por zona			Demanda de alimento para cierta cantidad de vacas (% del total)		
		zona1	zona2	zona3	50% de las vacas	25% de las vacas	25% de las vacas
Instancia original	4	100	50	250	60	80	100
Instancia 1	40	1000	500	2500			
Instancia 2	400	10000	5000	25000			
Instancia 3	4000	100000	50000	250000			

Tabla 7: definición de las instancias de prueba presentadas en este trabajo