

## OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE COSECHA DEL MAÍZ FORRAJERO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS.

Carlos Amiama

Roberto Pedrido

Carlos José Álvarez

*Universidad de Santiago de Compostela*

### Abstract

The process of silage corn harvest for feeding centers is characterized by the confluence of different vehicles (several self-propelled combines with a variable number of trucks carrying forage to the silo, where several vehicles operate packing the forage). Once generated the network of possible routes to use, and located plots to harvest, silos target, defined time spent in each plot, the volume of forage produced and the expected date of collection, the use of metaheuristics (genetic algorithms specifically) working over a initial solution (obtained using the algorithm of Solomon) allow to get routes that minimize the travel of the harvester.

Additionally, the use of software for modeling graphics events, based on discrete event simulation (systems in which changes occur in specific moments) allow to analyze the system behavior when modifying some of the state variables (number of trucks available, truck capacity, number of vehicles packing the silo, number of self-propelled harvesters, crop yields, ..). This paper wants to improve efficiency in the crop cycle by changes in the mix of resources used.

**Keywords:** *Route management, discrete event; simulation*

### Resumen

El proceso de cosecha de maíz forrajero para centros de alimentación se caracteriza por la confluencia de distintos vehículos (varias cosechadoras autopropulsadas, con un número variable de camiones que transportan el forraje al silo, donde actúan varios vehículos extendiendo y compactando el forraje). Una vez generada la red de posibles vías a utilizar, y ubicadas las parcelas a cosechar, los silos de destino, definidos tiempos invertidos en cada parcela, el volumen de forraje generado y la fecha prevista de recolección, la utilización de metaheurísticas (concretamente algoritmos genéticos) que actúan sobre una solución inicial (obtenida mediante el algoritmo de Solomon) permitirá la obtención de rutas que minimizan el recorrido de las cosechadoras.

Complementariamente, la utilización de un software para modelado de eventos gráficos, basado en la simulación de eventos discretos (sistemas en los que los cambios ocurren en instantes concretos) permitirá analizar el comportamiento del sistema cuando modificamos alguna de las variables de estado (número de camiones disponibles, capacidad de los camiones, número de vehículos compactando el silo, número de cosechadoras, rendimiento de las cosechadoras, ..). En este trabajo se ha buscado mejorar la eficiencia en el ciclo de cosecha variando la combinación de recursos utilizados.

**Palabras clave:** Gestión rutas; simulación; eventos discretos

## 1. Introducción

Recientes investigaciones apuntan a que una correcta gestión del proceso de ensilado de forraje puede mejorar la eficiencia en la alimentación del ganado vacuno, y consecuentemente en la producción de leche. Sin embargo para llevar a cabo un correcto ensilado se requiere maquinaria específica, de elevado coste. Consecuentemente en los últimos años se ha extendido en el noroeste español la creación de plantas de procesado de forraje, gestionadas de forma cooperativa. Estos centros se caracterizan porque los socios ceden la producción de sus parcelas (maíz forrajero) la planta de procesado, que gestiona de forma integral todo el proceso.

Una vez que el cultivo ha alcanzado su grado óptimo de madurez y humedad se deberá realizar el proceso de ensilado lo más rápidamente posible, evitando escorrentías y eliminando la mayor cantidad de oxígeno como sea posible.

El proceso de ensilado consta a su vez de las operaciones de cosechado, transporte, extendido y compactación del forraje. Estas operaciones involucran, de forma simultánea, cosechadoras, camiones para transporte y maquinaria para la compactación y extendido en el silo. Todos los equipos han de estar correctamente coordinados. Un bloqueo en las operaciones de transporte o descarga en el silo puede reducir la capacidad de trabajo de la cosechadora de forraje (Buckmaster, 2006). Para evitar esta situación numerosos autores han utilizado modelos de simulación para analizar y optimizar estos sistemas complejos. A modo de ejemplo pueden mencionarse los trabajos realizados por Berruto and Busato (2008), De Toro *et al.*(2012), Higgins and Davies (2004) and Ravula *et al.* (2008).

La simulación ha demostrado la utilidad del análisis de sistemas en la predicción de los costes globales del proceso así como en el dimensionamiento óptimo de los equipos que permita minimizar los tiempos muertos del proceso.

El objetivo global de este trabajo es modelizar el proceso de ensilado de maíz. Como objetivo específico se plantea analizar distintas combinaciones de recursos, con el objeto de mejorar la eficiencia del proceso. La consecución de un modelo que permita definir con suficiente aproximación el comportamiento del sistema permitirá, en trabajos futuros, realizar análisis de sensibilidad más exhaustivos con objeto de incrementar la eficiencia de utilización de los recursos.

## 2. Metodología

### 2.1 Modelado de las operaciones de ensilado

#### 2.2.1 Rendimiento de la cosechadora

El rendimiento de la cosechadora ha sido obtenido con la expresión 1, acorde ASABE EP 496.3 (ASABE, 2011).

$$C_m = C_a * Y \quad [1]$$

donde:

$C_m$ .- rendimiento ( $t \cdot h^{-1}$ )

$C_a$ .- capacidad efectiva de trabajo ( $ha \cdot h^{-1}$ )

$Y$ .- rendimiento del cultivo ( $t \cdot ha^{-1}$ )

La capacidad efectiva de trabajo de la cosechadora está afectada por varios factores (Amiama *et al.*,2010), por lo que será considerada como una variable aleatoria en el modelo. Se han analizado cosechadoras de 6 y 8 líneas. El rendimiento del forraje también será considerado como una variable aleatoria, dada su alta variabilidad entre parcelas. El análisis estadístico de la distribución se ha realizado con el test de Kolmogorov-Smirnov, usando el paquete estadístico Statgraphics. En la tabla 1 se muestran las distribuciones obtenidas para cada variable.

**Tabla 1. Distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias**

Variables	Unidades	Distribución
Ca 6 líneas	ha.h <sup>-1</sup>	N(1,19;0,29)
Ca 8 líneas	ha.h <sup>-1</sup>	N(1,39;0,34)
Y	t.ha <sup>-1</sup>	N(47,0;4,3)

Han de considerarse además los tiempos necesarios entre las sucesivas parcelas a cosechar. Dichos tiempos se han medido y se introducen en el modelo como variables deterministas.

#### 2.2.2 Ciclo del transporte

El ciclo del transporte sin tiempos de espera CTt (h.ciclo<sup>-1</sup>), fue obtenido a partir de los tiempos entre dos operaciones sucesivas de descarga, de cada transporte en el ciclo, de acuerdo con la expresión 2.

$$CTt = T_{tu,a} + T_t + T_{ht,t} \quad [2]$$

donde:

T<sub>tu,a</sub>: tiempo de alineación y descarga para el transporte en el silo (h.ciclo<sup>-1</sup>). Este tiempo comprende el periodo desde la llegada del transporte al silo hasta que se finaliza la descarga y el camión inicia el desplazamiento a la parcela. Un valor medio de 0,60 h.ciclo<sup>-1</sup> fue considerado, a partir de la medición de 30 descargas.

T<sub>ht,t</sub>: tiempo de transferencia del forraje entre la cosechadora y el camión, (h.cycle<sup>-1</sup>). Se ha obtenido un valor de 0,033 h.ciclo<sup>-1</sup>, analizando 156 ciclos.

T<sub>t</sub>: tiempo de desplazamiento (h.ciclo<sup>-1</sup>). Para determinar las velocidades de desplazamiento se han analizado los valores proporcionados por GPS colocados en los camiones. La velocidad de desplazamiento de los camiones utilizada para la simulación se ha determinado con una regresión lineal (Harrigan, 2003). Los parámetros de la regresión se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2. Coeficientes de regresión para la velocidad**

Transporte	Constante	D (km)	Nivel	Correlación parcial
------------	-----------	--------	-------	---------------------

significación				
Vacío	28,417	0,864	1 %	0,65
Lleno	22,176	0,898	1%	0,66
Variable dependiente: S (km.h <sup>-1</sup> )				
D: distancia (km)				

Acorde a los ensayos de campo realizados, una distancia máxima de 40 km será considerada en el modelo.

### 2.2.3 Operación de compactado

El extendido y compactado en el silo es realizado por tractores y una pala cargadora. Su capacidad viene determinada por su peso. Una regla comúnmente utilizada es que un tractor puede compactar, aproximadamente, el doble de su peso en MS de forraje por hora. El extendido y compactado puede realizarse simultáneamente con la descarga, ya que los silos poseen gran anchura. La capacidad de compactado de los dos vehículos considerados se ha establecido en 73,8 t/h en el caso de la pala cargadora y 36 t/h en el caso del tractor.

### 2.2.4 Metodología para la asignación de camiones a la cosechadora

La solución matemática que proporciona la utilización de la cosechadora ( $Uh$ ) con el menor coste total (costes de cosechado + costes de transporte) precisa una comparación de los costes asociados al uso de la cosechadora con 1 transporte, con 2,.. Los costes se han determinado con la expresión 2.

$$\frac{Nt \times C + K \times C}{Ce \times Uh} = \frac{C \times (Nt + K) / Uh}{Ce} \quad [2]$$

donde:

$Nt$ : Numero de camiones involucrados en el transporte.

$C$ : Coste del transporte (€/h)

$C'$ : Coste de la cosechadora (€/h)

$K$ : Ratio  $C'/C$

$Ce$ : Capacidad efectiva de trabajo de la cosechadora (ha/h)

$Uh$ : Utilización de la cosechadora (hora de actividad/h)

El objetivo es calcular la  $Uh$  que justifique aumentar la flota de 1 a dos camiones, de 2 a 3,

etc.

El mínimo coste de  $n+1$  camiones viene dado por la expresión 3.

$$\frac{(Nt + 1) \times C + K \times C}{Ce} = \frac{C \times (Nt + 1 + K)}{Ce} \quad [3]$$

La intersección de las dos curvas se producirá en:

$$Uh = \frac{Nt + K}{Nt + 1 + K} \quad [4]$$

El valor de  $Uh$  determinará la asignación de camiones, de forma que, cuando un camión quede disponible, se asignará a la cosechadora con menor  $Uh$ .

## 2.2 Simulación

El paquete de software para la simulación de eventos discretos Sigma® (Custom Simulations, 1178 Laurel St., Berkeley, CA 94708) ha sido utilizado para ejecutar el modelo. Se pretende buscar la combinación de recursos que minimicen el coste económico de la actividad. No obstante se ha mantenido la ventana temporal de 36 días de actividad (6 semanas), con una variación de  $\pm 10\%$ . Se busca mantener de forma aproximada la fecha de recolección de las parcelas, que está definida por la solicitud de los socios, y garantiza el contenido óptimo en MS del forraje (entre el 32 y el 35 %).

Para realizar la simulación es necesaria una información de partida. Se han considerado variables deterministas y variables estocásticas. En la tabla 4 se relacionan las variables de entrada consideradas.

**Tabla 4. Variables de entrada en el modelo**

Variables deterministas	Variables estocásticas
Número de cosechadoras utilizadas	Capacidad efectiva de trabajo de las cosechadoras
Parcelas a cosechar por cada cosechadora	Rendimiento de las parcelas
Superficie de la parcela a cosechar	
Secuencia de cosechado de las parcelas	
Tiempo de desplazamiento entre parcelas de la cosechadora	
Peso medio de la tolva	
Propietario de la parcela	
Número de camiones disponibles	
Capacidad de los camiones	
Tiempo de desplazamiento parcela-CAVI de los camiones	
Tiempo para la alineación y descarga de forraje en el camión	
Tiempo de alineación y descarga del camión en el silo	
Capacidad de compactado	

La simulación comienza con la ejecución del evento RUN, que introduce la información de variables de entrada. Esta información incluirá la secuencia de cosechado de las parcelas obtenida a partir de un heurístico genético. Esta construcción se realiza, de forma muy sintética, construyendo una población inicial ordenando los agricultores por fecha de solicitud. Para determinar el orden de las parcelas de cada agricultor se escogerá aleatoriamente una parcela y se irán añadiendo más en función de la mínima distancia a la última parcela insertada. La selección se realiza por el método del torneo. Se realizarán una serie de cruces y mutaciones. La condición de terminación se alcanza cuando se han realizado un número predeterminado de iteraciones. Una vez definida la secuencia de fincas se simula el comienzo de la actividad de las cosechadoras y se asignan los camiones a cada cosechadora, acorde al criterio establecido en el epígrafe 2.2.4. Cuando un camión es cargado se desplaza al silo. Dependiendo del número de camiones en espera (que a su vez dependerá del rendimiento de los equipos de extendido y compactación) la descarga en el silo se realizará de forma inmediata o bien existirán tiempos de espera. Una vez efectuada la descarga la asignación de camiones a las cosechadoras se realizará atendiendo al criterio de garantizar el mayor  $Uh$  de las cosechadoras. Una vez finalizada la recolección de una parcela (determinado por el rendimiento del cultivo y la capacidad específica de trabajo de la cosechadora) la cosechadora se desplazará a la siguiente parcela a cultivar. La iteración finalizará cuando se completen todas las parcelas a cosechar y se haya finalizado el

extendido y compactación de todo el forraje. Se han ejecutado 100 iteraciones por simulación. En la figura 1 se muestra la simulación efectuada.

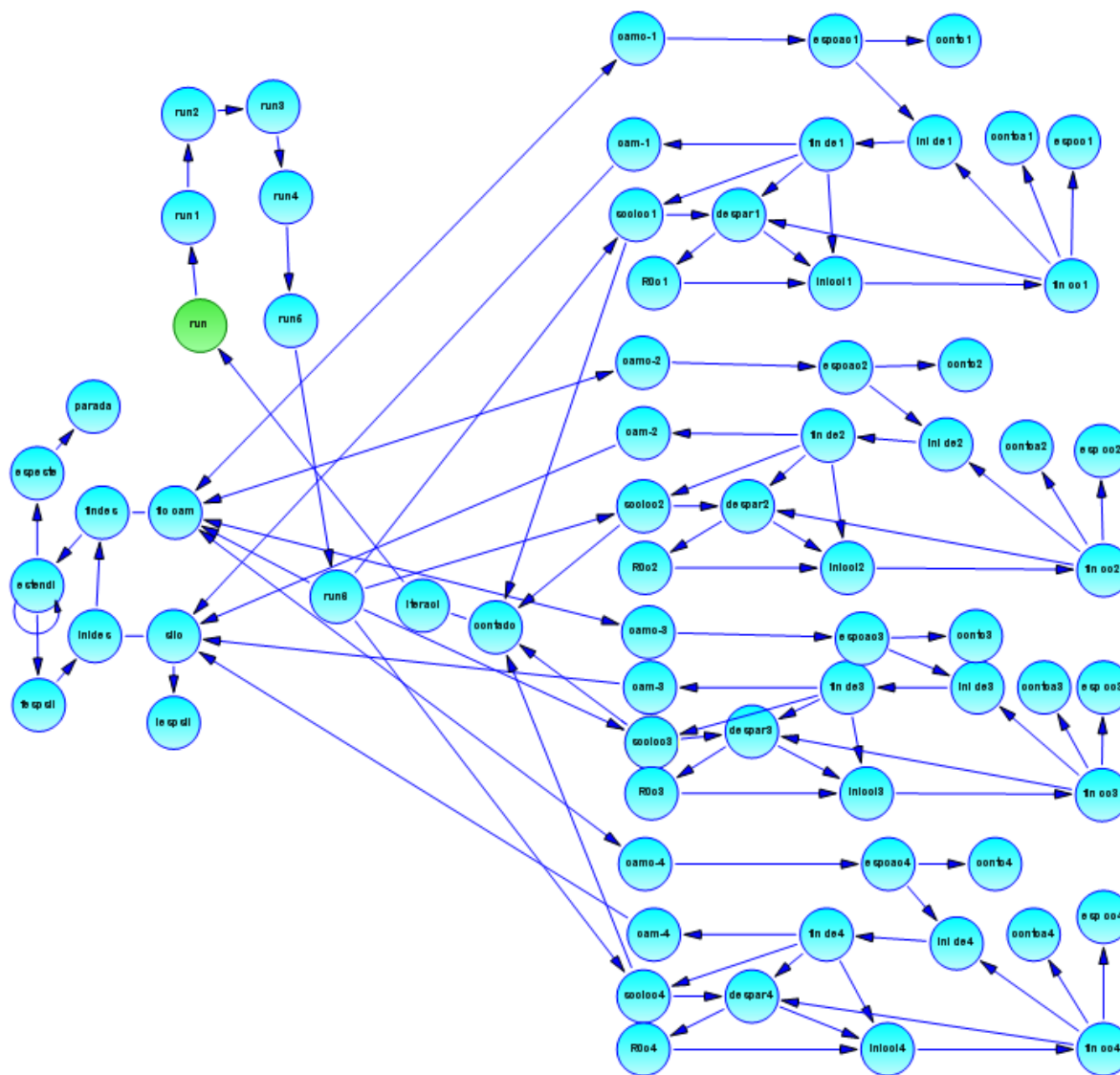


Figura 1. Simulación del proceso de ensilado

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos son preliminares a falta de una mayor depuración del modelo. En las tablas 5 y 6 se reflejan los valores obtenidos (tiempos de espera y tiempos de actividad), simulando la utilización de dos cosechadoras distintas (6 líneas y 8 líneas) y dos rendimientos distintos de extendido y compactado (2 y 4 t/min respectivamente)

**Tabla 5. Tiempo de actividad de las cosechadoras (días)**

Cosechadora	T Cosech. 1	T Cosech. 2	T Cosech. 3	T Cosech.4
8 líneas	19,18	19,24	23,27	23,85
6 líneas	28,16	28,28	34,26	34,70

**Tabla 6. Tiempos de espera de las cosechadoras (días)**

Cosechadora	Rto extendido	Nº camiones	T Cosech. 1	T Cosech. 2	T Cosech. 3	T Cosech. 4
6 líneas	2 t/min	24	14,37	13,00	12,39	14,08
6 líneas	2 t/min	36	12,72	12,07	9,46	9,00
6 líneas	4 t/min	24	8,17	7,85	9,26	9,53
8 líneas	2 t/min	36	31,79	31,61	35,92	40,70
8 líneas	2 t/min	56	21,68	20,64	22,33	22,63

En la tabla 5 se puede observar que, como es previsible, el incremento en la capacidad específica de la cosechadora se traduce en unos menores tiempos de actividad, indicando un correcto comportamiento del modelo.

En la tabla 6 se deduce como el rendimiento del equipo de extendido y compactación es determinante en los tiempos de espera de la cosechadora, de forma que con rendimientos altos del equipo, los tiempos de espera de la cosechadora se reducen significativamente. Por el contrario, rendimientos de los equipos de extendido reducidos originan cuellos de botella en el proceso, que limitan la eficiencia del mismo. En este último supuesto el incremento en el número de camiones utilizado no se traduce en un incremento en el rendimiento del proceso.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se ha modelizado el comportamiento de los vehículos implicados en la recolección de maíz forrajero para ensilado. Se han estudiado los tiempos y rendimientos asociados a cada proceso con el fin de poder simular dicho proceso con una herramienta de software específica. El modelo obtenido todavía está en fase de depuración, por lo que los resultados son todavía muy preliminares.

El análisis realizado sugiere un que el modelo se está comportando correctamente, ya que el incremento de la capacidad efectiva de trabajo de las cosechadoras se traduce en unos menores tiempos de actividad.

En nuestro estudio se observa como el rendimiento del extendedor de forraje es clave en el comportamiento del sistema, de forma que, con rendimientos de extendido bajo, el incremento del número de vehículos de transporte tiene una incidencia menor sobre los tiempos de espera de la cosechadora que el incremento de la capacidad efectiva de trabajo del equipo de extendido y compactado.



## 5. Referencias

Amiama, C., Bueno, J., Pereira, J.M., 2010. Prediction of effective field capacity in forage harvesting and disk harrowing operations. Transactions of ASABE 53(6):1739-1745.

ASABE Standars, 2011. EP 496.3. Agricultural machinery management. St. Joseph, Mich.USA.

Berruto, R., Busato, P., 2008. System approach to biomass harvest operations: simulation modeling and linear programming for logistic design. In: Proc. of the 2008 ASABE Annual International Meeting, Providence, Rhode Island, June 29 – July 2. ASAE Paper No.084565, 2950 Niles Rd., St Joseph, MI 49085-9659, USA.

Buckmaster, D. R., 2006. A systems approach to forage harvest operations. In Proc. of the ASABE Annual International Meeting, Portland, Oregon, 9–12 July. ASAE Paper No.061087, 2950 Niles Rd., St Joseph, MI 49085-9659, USA.

De Toro, A., Gunnarsson, C., Lundin, G., Jonsson, N., 2012. Cereal harvesting – strategies and costs under variable weather conditions. Biosystmes engineering, Volume 111, Issue 4, 429-439.

Higgins, A., Davies, I., 2005. A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. Computers and electronics in agriculture. 47, 85-102.

Ravula, P.P., Grisso, R.D., Cundiff, J.S. Cotton logistics as a model for a biomass transportation system. Biomass and Bioenergy. 32, 314-325.

## 6. Agradecimientos

Agradecimiento a la Cooperativa Agraria “Os Irmandiños”, en especial al responsable de la gestión del parque de maquinaria, Santiago Sousa, su colaboración desinteresada en este trabajo.

## Correspondencia (Para más información contacte con):

Carlos Amiama Ares.  
Área de Proyectos de Ingeniería  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Santiago de Compostela  
Campus universitario s/n 27002 Lugo  
Phone: +34 982 252 231 Ext. 23627  
E-mail : carlos.amiama@usc.es