

Calibración y Validación del Modelo SIMBA-POP en la Zona Bananera del Urabá Antioqueño, Colombia

SIMBA-POP Model: Calibration and Validation in Urabá - Antioquia, Colombia

Germán Wbeimar Guarín Giraldo¹ y Andrés Ochoa²

Resumen. SIMBA-POP es un modelo desarrollado en Martinica (Francia), basado en los conceptos de cohortes y cadenas de cohortes de plantas, simula la dinámica poblacional de plantaciones de banano. El modelo original, modificado por Ochoa (2010), se programó en el software EVOLUCIÓN 4.0, desarrollado por el grupo SIMON de la Universidad Industrial de Santander y se calibró y validó para las condiciones de temperatura media habituales en el Urabá Antioqueño; la más importante zona productora de banano en Colombia. En el proceso de calibración se ajustan los ciclos de embolsado y cosecha, así como los tiempos en que ocurren los máximos valores de embolsado. Para controlar la calibración se usó la desviación media (DM), el error medio de predicción (EMP), el error cuadrático medio de predicción (ECMP), la raíz del error cuadrático medio (RECMC), curvas de masa y coeficiente de correlación lineal. Los resultados mostraron que SIMBA-POP es capaz de simular de forma verosímil la dinámica del ciclo anual de producción en Urabá; particularmente reproduce bien los tiempos de los picos y los valles de producción, aunque la magnitud de estos valles y picos es altamente sensible a los parámetros del modelo y condiciones climáticas no consideradas.

Palabras clave: Simulación de cultivos, banano, gestión de cultivos, agricultura de precisión.

Abstract. SIMBA - POP is a model developed in Martinique (France), which uses the concepts of cohorts and cohort chains to simulate the population dynamics of a commercial plantation of bananas. The original model was slightly modified by Ochoa (2010) in order to correct for an error in the flowering rate curve. The model was programmed in EVOLUCION 4.0. SIMBA - POP was then calibrated and validated for the normal climatic pattern in Urabá (Antioquia). Care was taken that the model adequately represent bagging and harvesting cycles, and the time at which maximum values of bagging (flowering) were reached. To evaluate the calibration we used average deviation (DM), the average error of prediction (EMP), the error mean square of prediction (ECMP), the root of the error mean square (RECMC), mass curves and correlation coefficient. Results showed that SIMBA-POP is a suitable tool for simulating banana crops in Urabá; the model reproduced quite well the times of the peaks and the valleys of production, although the magnitude of these peaks and valleys is considerably sensitive to model parameters.

Key words: Crop simulation model, banana, crop management, precision agriculture.

La dinámica de los cultivos comerciales de banano responde a diversos factores como las condiciones climáticas, las prácticas agrícolas y la ocurrencia de enfermedades y plagas. Bajo un adecuado suministro de agua y minerales, la temperatura es el principal responsable de la dinámica de cultivo del banano, debido a que afecta su tasa de desarrollo, la acumulación de materia seca, entre otros procesos (Tixier *et al.*, 2007; Turner, 1994). En el banano de exportación, los precios presentan variabilidad a lo largo del año, normalmente con mayores valores en el primer semestre (Tixier *et al.*, 2007; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), 2005). La administración del cultivo optimiza los ingresos económicos buscando que las producciones ocurran en las épocas de precios más altos. El número de

factores implicados en la producción bananera, así como la complejidad de sus relaciones y efectos, obligan a una buena comprensión del sistema que permita tomar decisiones oportunas, con el fin de alcanzar los máximos rendimientos económicos en el cultivo comercial. De esta manera, la simulación de mediano y largo plazo se convierte en una herramienta clave de apoyo a la gestión de cultivos de banano.

Las plantaciones de banano presentan un comportamiento asincrónico, esto es, cada planta se desarrolla a su propio ritmo. En banano, una población homogénea desde el establecimiento de la plantación se convierte en una población heterogénea luego de unos pocos ciclos, (Turner, 1994; Tixier *et*

¹Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín – Centro de Investigaciones del Clima de Colombia. Carrera 80 No 65-223 - Núcleo Robledo, Medellín, Colombia. <gwguarin@unal.edu.co.>

² Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín - Centro de Investigaciones del Clima de Colombia. Carrera 80 No 65-223 - Núcleo Robledo, Medellín, Colombia. <aochoaj@unal.edu.co>

Recibido: Agosto 08 de 2010; aceptado: Diciembre 27 de 2011.

al., 2004), presentando al mismo tiempo plantas en diferentes estados de desarrollo. Este fenómeno tiene un fuerte impacto en la dinámica del agua, nutrientes, la cobertura del suelo, las plagas y enfermedades, y por supuesto la cosecha. Por tal motivo, modelos genéricos como CROPSYST (Stöckle *et al.*, 2003) o STICS (Brisson *et al.*, 1998) no tienen la capacidad de simular la dinámica de la producción en cultivos comerciales de banano. SIMBA-POP (Tixier *et al.*, 2004) es un modelo de la estructura poblacional de una plantación de banano desarrollado por investigadores franceses. En este trabajo se evalúa la capacidad del modelo SIMBA-POP para simular la dinámica poblacional de plantaciones de banano en Urabá (Colombia).

MATERIALES Y MÉTODOS

SIMBA-POP (Tixier *et al.*, 2004) incorpora los conceptos de cohortes y cadenas de cohortes de plantas con el fin de dar cuenta de la asincronía propia de este tipo de cultivos. El modelo fue planteado para una resolución espacial a nivel de parcela y temporal a escala semanal. SIMBA-POP simula la dinámica poblacional de la plantación considerando la temperatura como la única variable climática moduladora del desarrollo de la plantación, es decir que asume que en el cultivo no se presentan limitantes por nutrientes, agua, enfermedades, pestes, etc. SIMBA-POP es parte del modelo SIMBA (Tixier *et al.*, 2008), del cual también forman parte otros módulos que simulan procesos como el crecimiento (SIMBA-GROW), propiedades físicas del suelo (SIMBA-SOIL), balance de agua (SIMBA-WAT), densidad de población de nemátodos (SIMBA-NEM) y dinámica del nitrógeno en el suelo (SIMBA-N).

En SIMBA-POP una cohorte se define como un grupo de individuos caracterizados por un mismo estado fenológico. Una cadena de cohortes es un grupo de cohortes ligadas una a otra por flujos controlados por varios procesos o leyes. El modelo está compuesto por dos cadenas de cohortes separadas por el momento de la floración: a) cadena de cohortes de prefloración y b) cadena de cohortes de postfloración. La transición de plantas entre las cohortes está determinada por leyes estocásticas basadas en la acumulación de unidades térmicas (grados-día), que al alcanzar ciertos umbrales, determina el paso entre estados fisiológicos. Se identifica como BT al umbral (grados - día), en el cual se inicia la selección de rebrotes de una cohorte. El modelo lleva la cuenta semanal de

los procesos de rebrote, floración y cosecha de todas las plantas. La asincronía típica de una plantación de banano se incorpora en el modelo con las siguientes leyes estocásticas (Ganry, 1978; Cottin, 1987):

$$s_{i,t} = a_s \times \exp\left(-5\left(\frac{\ln(Ws_{i,t} / b_s)}{c_s}\right)^2\right) \quad (1)$$

$$fl_{i,t} = a_f \times \exp\left(-5\left(\frac{\ln(Wf_{i,t} / b_f)}{c_f}\right)^2\right) \quad (2)$$

Dónde $s_{i,t}$ es la tasa de selección de rebrotes y $fl_{i,t}$ es la tasa de floración. Los subíndices i y t , representan la cohorte y la semana respectivamente, el subíndice f significa floración y el subíndice s rebrote (en inglés sucker). W_s y W_f representan el número de semanas, transcurridas desde que se hayan alcanzado los umbrales de acumulación de unidades térmicas para ambos procesos. Finalmente a , b , y c son parámetros de las funciones; el conjunto de estos para cada función, debe ser tal que el área bajo la curva sea igual a 1.

La versión corregida por Ochoa (2010), de la ecuación presentada por Tixier *et al.*, (2004) para calcular el número de plantas florecidas en cada cohorte y en cada semana es:

$$FL_{i,t} = N_{i-Wf_i,t-1,t-Wf_i,t-1} * fl_{i,t} \quad (3)$$

Donde $N_{i-Wf_i,t-1,t-Wf_i,t-1}$ representa el número total de plantas en la correspondiente cohorte cuando el proceso de florecimiento inicia. $FL_{i,t}$ es el número de plantas florecidas en la cohorte i y en el tiempo t , y $fl_{i,t}$ es la tasa de floración.

La cosecha ocurre cuando los racimos alcanzan cierto grado de madurez (cuantificado como grados-día). La tasa de cosecha para una cohorte, depende considerablemente de decisiones administrativas basadas principalmente en las condiciones de mercado (como el lugar de destino). En Urabá generalmente, una vez se alcanza la madurez fisiológica del racimo (edad desde florecimiento), éste se cosecha de 9, 10, 11, 12 y 13 semanas, dependiendo si el banano se dirige al mercado Asiático, Europeo o Norteamericano. SIMBA-POP representa la tasa de cosecha para una cohorte por un histograma de tres semanas donde en la primera semana se cosecha el 20% de la población de racimos, en la segunda semana el 62,5% y en la tercera el restante 17,5%.

La programación de SIMBA-POP en Evolución 4.0 se realizó siguiendo el diagrama que se muestra en la Figura 1. La parte superior de la figura esquematiza la cadena de cohortes de prefloración. En dicha cadena se observa un contador de temperatura, dos flujos de semanas desde umbral (rebrote y floración), un flujo de temperatura, un flujo de cohortes, un flujo de rebrotes seleccionados y otro de plantas florecidas, así como las relaciones entre ellas. De esta primera cadena de cohortes se obtiene como resultado el número total de

rebrotos y el número total de plantas florecidas por semana, las cuales pasan a la cadena de cohortes de postfloración, representada en la parte inferior de la figura. Esta cadena inicia la simulación una vez ingresen plantas florecidas provenientes de las diferentes cohortes de la cadena prefloración. Una nueva cohorte se crea con todas las plantas florecidas que ingresan en una semana a la cadena de postfloración, iniciando un nuevo conteo de unidades térmicas acumuladas necesarias para la maduración y cosecha de los racimos.

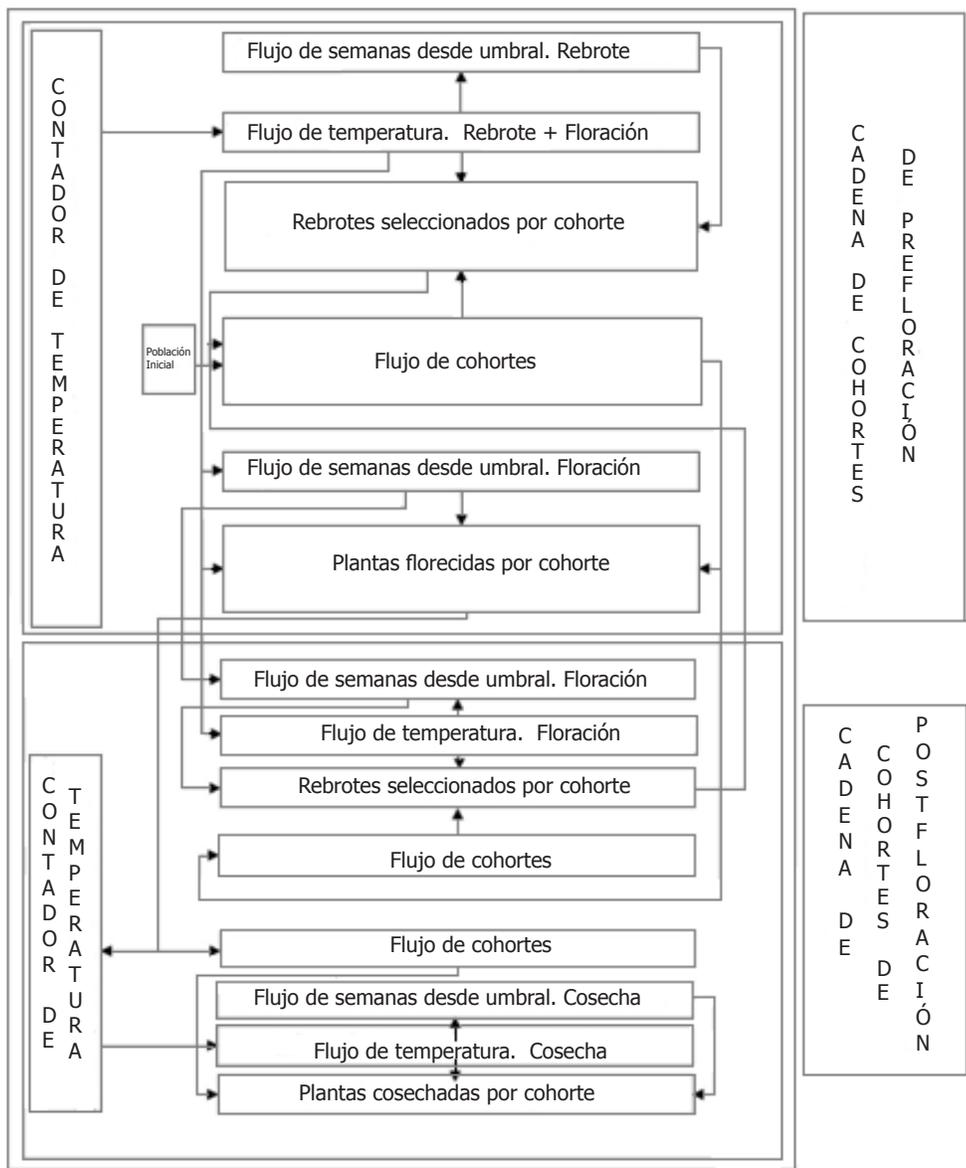


Figura 1. Diagrama de programación del SIMBA-POP en Evolución 4.0 en una plantación de banano en el Urabá Antioqueño, Colombia.

Originalmente el modelo SIMBA – POP, fue calibrado y validado para *Musa spp.*, grupo AAA, cv. Cavendish Gran Enano (Tixier *et al.*, 2004). Para la realización de este trabajo se tuvo acceso a información histórica de 10 fincas con lotes de diferentes cultivares: Valery, Gran Enano y/o Williams. Usando los siguientes criterios se seleccionaron dos fincas con la mejor información histórica para calibrar y validar SIMBA-POP:

- El efecto de los eventos climáticos extremos (fases del ENSO), sobre la serie de embolse; durante el período de registro debe ser el menor posible.

- Históricamente debe poseer baja afectación de enfermedades, para el caso Sigatoka Negra, principal enfermedad limitante.
- La serie de embolse de la finca debe presentar un comportamiento similar a la mayoría de las fincas. Es decir, no debe mostrar disminuciones o ganancias abruptas en los valores de embolse como consecuencia por ejemplo de un vendaval o una inundación.

De esta manera, se seleccionaron las fincas, Doña Ángela para la calibración, y María Rosario para la validación. La información básica de los lugares mencionados, se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las fincas Doña Ángela y María Rosario, escogidas para calibrar y validar el modelo SIMBA-POP.

	Doña Ángela	María Rosario
Latitud	7°54'04.87" N	7°54'01.45" N
Longitud	76°41'43.87" W	76°40'17.59" W
Elevación [msnm]	15	19
Área bruta [ha]	194,96	215,65
Área neta [ha]	164,47	171,98
Período de registro de embolse	2001-s01 a 2008-s23	2001-s01 a 2008-s23
Período de registro de cajas exportadas	1999-s01 a 2008-s22	1999-s01 a 2008-s22
Período de registro de ratio	1999-s01 a 2008-s22	1999-s01 a 2008-s22
Precipitación media anual [mm]	2.435	2.389
Suelo predominante	Texturas finas a moderadamente finas	Texturas finas a moderadamente finas
Cultivar plantado	Valery, Gran Enano y William	Valery y Gran Enano

El proceso de calibración y validación se realizó bajo las siguientes premisas:

- Se modifican los parámetros de la ecuación de rebrotes y el umbral BT (umbral de unidades térmicas para el inicio de la selección de rebrotes).
- La combinación de los parámetros a_f , b_f , c_f , en la ecuación de rebrotes, debe garantizar que el área bajo la curva sea uno (1).
- Teniendo en cuenta el tiempo transcurrido entre floraciones, la población de rebrotes está limitada a un rango comprendido entre 1,4 a 1,6 veces por año la población establecida.
- Solo se tiene en cuenta la temperatura máxima, mínima y media como conductoras del proceso de simulación.
- No se consideran muertes y/o remplazos de plantas, por lo que la población (unidades de producción) se mantiene constante durante toda la simulación.

- No se considera afectación de la plantación por enfermedades, plagas y/o eventos climáticos.
- La tasa de racimos embolsados representa la tasa de florecimiento del modelo.
- Se consideró una densidad de plantación promedio de 1.750 plantas/ha.

Como criterios de evaluación de la calibración y la validación se usaron los siguientes estimadores de error, propuestos y usados por Tixier *et al.* (2004):

La Desviación Media (DM) entre los datos observados (históricos) y los simulados, que se define y calcula según la siguiente ecuación:

$$DM = \frac{\sum_1^n (Y_i - X_i)}{n} \quad (4)$$

Dónde Y_i es el i -ésimo valor simulado, X_i es el i -ésimo valor observado y n el tamaño de la muestra analizada. Valores positivos (negativos) de DM indican que

el modelo tiende a sobreestimar (subestimar) los valores observados. DM tiene el inconveniente de que errores positivos y negativos pueden compensarse y dar la apariencia de un muy buen ajuste cuando no lo es en realidad. El Error Medio de Predicción (EMP) corrige esta falencia al sumar los valores absolutos de los errores. Se calcula según la ecuación:

$$EMP = \frac{\sum_1^n (|Y_i - X_i|)}{n} \quad (5)$$

El Error Cuadrático Medio de Predicción (ECMP) es un estadístico importante para la evaluación de la precisión en la predicción de un modelo de simulación (Wallach y Goffinet, 1989; Gauch *et al.*, 2003), puede incluso dividirse en tres componentes (Gauch *et al.*, 2003).

$$ECMP = \frac{\sum_1^n (Y_i - X_i)^2}{n} \quad (6)$$

La Raíz del Error Cuadrático Medio de Predicción (RECMP) se usa para expresar el error en las mismas dimensiones y unidades de los valores observados:

$$RECMP = \sqrt[3]{ECMP} = \sqrt[3]{\frac{\sum_1^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (7)$$

RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestra la mejor combinación de parámetros de la ecuación de rebrotes y el umbral BT, resultado del proceso de calibración; la combinación de parámetros está acompañada del valor de los estadísticos de control. Se presentan los estadísticos para el cálculo de las magnitudes de florecimiento y calculados con base en la habilidad del modelo para pronosticar los picos de embolse.

Tabla 2. Calibración del SIMBA – POP modificado para la zona Bananera del Urabá Antioqueño, Colombia.

	Parámetros de la ecuación de selección			BT [°C/d]	DM (Racimos florecidos)	EMP (Racimos florecidos)	ECMP (Racimos florecidos ²)	RECMP (Racimos florecidos)	R*
	as	bs	cs						
Magnitud de Embolse	0,171	5,5	0,379	2080	-3,3	1032,0	1882991,0	1372,2	0,82
	Parámetros de la ecuación de selección			BT [°C/d]	DM (Semanas)	EMP (Semanas)	ECMP (Semanas ²)	RECMP (Semanas)	
	as	bs	cs						
Oscilación de la Serie. Picos de Cosecha	0,171	5,5	0,379	2080	-0,6	2,2	7,4	2,7	

* Coeficiente de correlación lineal entre las series de floración simulada y registrada.

Como la simulación debe partir desde el establecimiento de la plantación, inicialmente el modelo arroja picos elevados y valles demasiado bajos. Este comportamiento es normal en una plantación comercial hasta que se logra el asincronismo típico de una plantación, luego que han transcurrido las primeras dos o tres cosechas. Ese mismo comportamiento puede apreciarse en Tixier *et al.* (2004); Tixier *et al.* (2007). Se observó que el modelo logra estabilizarse en magnitud aproximadamente al segundo año de iniciada la simulación y a partir de ese momento predice con buena exactitud el número de racimos embolsados y cosechados por un periodo de hasta tres años (Figura 2, Figura 3 y Figura 4).

La oscilación de las series de embolse y cosecha, particularmente el tiempo en alcanzar picos y valles, es

capturado inmediatamente por el modelo y permanece aproximadamente constante por el periodo de la simulación que fue de seis años. La Figura 3 muestra la curva masa de la serie simulada de florecimiento con el modelo calibrado, comparada con los datos de embolse (florecimiento) registrados en campo. Obsérvese que durante las 156 semanas (tres años) el comportamiento de la curva indica que el modelo no tiene tendencia a sobreestimar o subestimar sostenidamente la magnitud del embolse para la finca.

En la Figura 2 se observa el comportamiento de las series de embolse simuladas y registradas; valores en las series históricas alejados de la serie simulada, pueden explicarse por deficiencias del modelo, parámetros no considerados o condiciones extremas que pueden corresponder a daños por vientos o resiembras no

identificadas en las series históricas. Debe recordarse que el modelo solo utiliza la temperatura media como variable externa direccionadora del proceso de simulación, y tal como lo indica Turner y Fortescue (2010), es importante la inclusión de un factor que

además de la temperatura, incluya el fotoperiodo, la temperatura y el balance de humedad del suelo como variables direccionadoras del proceso, ésta es una línea hacia la cual se debe continuar el estudio del modelo SIMBA.

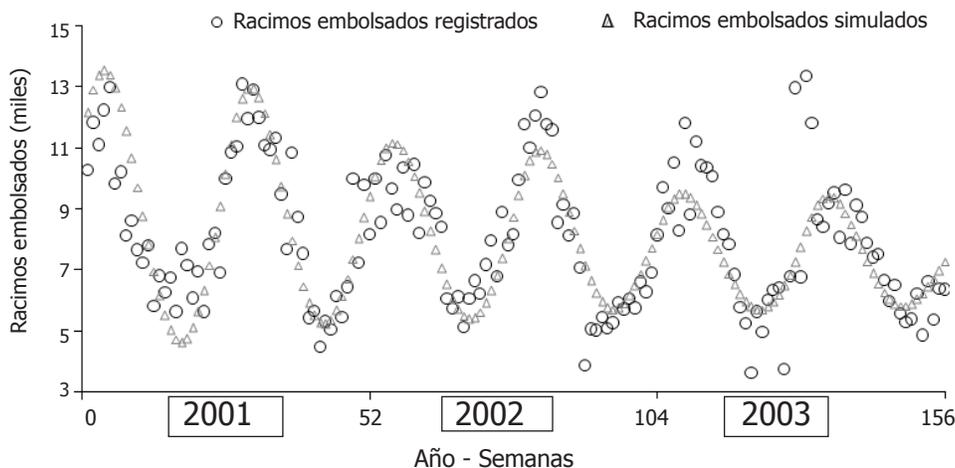


Figura 2. Serie de racimos simulados y registrados para la finca Doña Ángela en la zona bananera del Urabá Antioqueño, Colombia.

La Figura 3, es una curva masa de las semanas, desde el inicio de la simulación, en el que se alcanzan los picos de embolse respecto a los picos registrados, cuando los círculos se encuentran exactamente sobre la línea oblicua punteada, indican que el modelo predijo exactamente el tiempo en que se logró ese pico; ubicaciones por debajo o por encima, señalan una subestimación o

sobreestimación del tiempo en que se logra el pico de embolse. Se observa como la combinación de parámetros provenientes de la calibración permiten que el modelo, a largo plazo (seis años) no subestime o sobreestime sistemáticamente el tiempo en que se alcanzan los picos de embolse y por el contrario presenta un buen ajuste a los datos registrados.

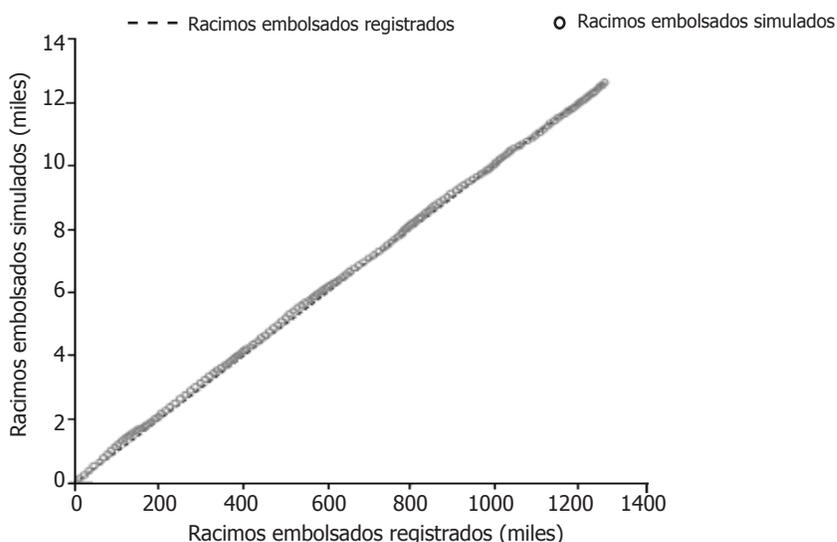


Figura 3. Curva de racimos embolsados acumulados en la zona bananera del Urabá Antioqueño, Colombia.

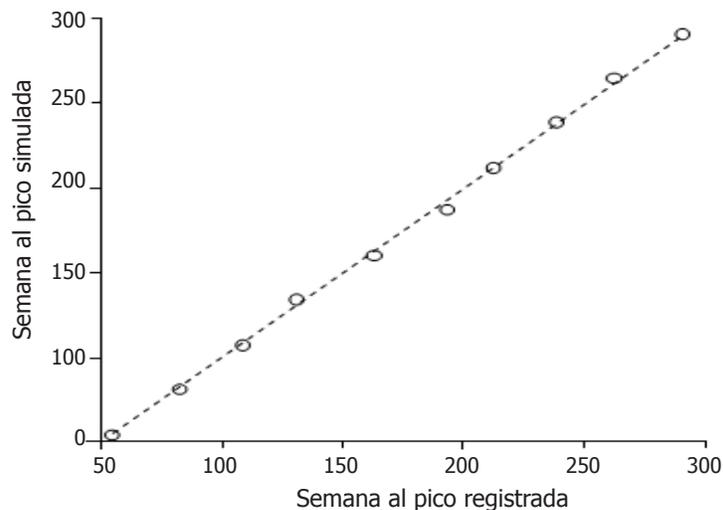


Figura 4. Semana al pico simulada y registrada en la zona bananera del Urabá Antioqueño, Colombia.

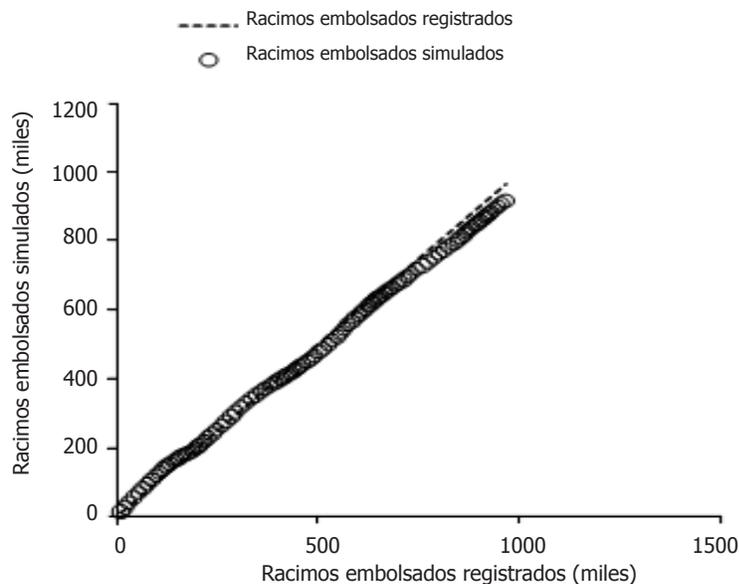


Figura 5. Curva de racimos embolsados acumulados para la finca María Rosario, en la zona bananera del Urabá Antioqueño, Colombia.

Validación. Con el modelo calibrado se procedió a realizar el proceso de validación, el cual consistió en observar el comportamiento de las series de embolse registradas y simuladas en su magnitud y periodo. Del proceso de selección resultó la finca María Rosario como adecuada para realizar el proceso de calibración. En las Figuras 5 y 7 las curvas de masa y serie de tiempo muestran que luego de iniciar y estabilizar la simulación, el modelo

es capaz de reproducir adecuadamente la magnitud del embolse. En la figura de serie de tiempo (Figura 7), las magnitudes de picos y valles, son factores que se deben estudiar con mayor detalle con la incorporación de otras variables como fotoperiodo y régimen hídrico del suelo. En la Figura 6, se muestra el buen comportamiento del modelo para predecir los tiempos en alcanzar los picos de embolse. Las Figuras 8 y 9 muestran los ciclos de embolse y

cosechas simulados y registrados para la finca María Rosario, y en la cual se puede observar el buen

pronóstico de las series simuladas respecto a las registradas.

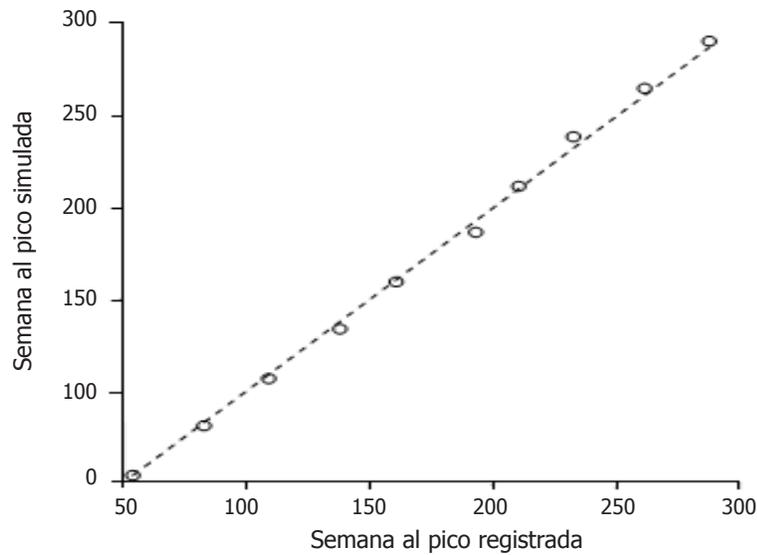


Figura 6. Semana al pico simulada y registrada para la finca María Rosario, en la zona bananera del Urabá Antioqueño, Colombia.

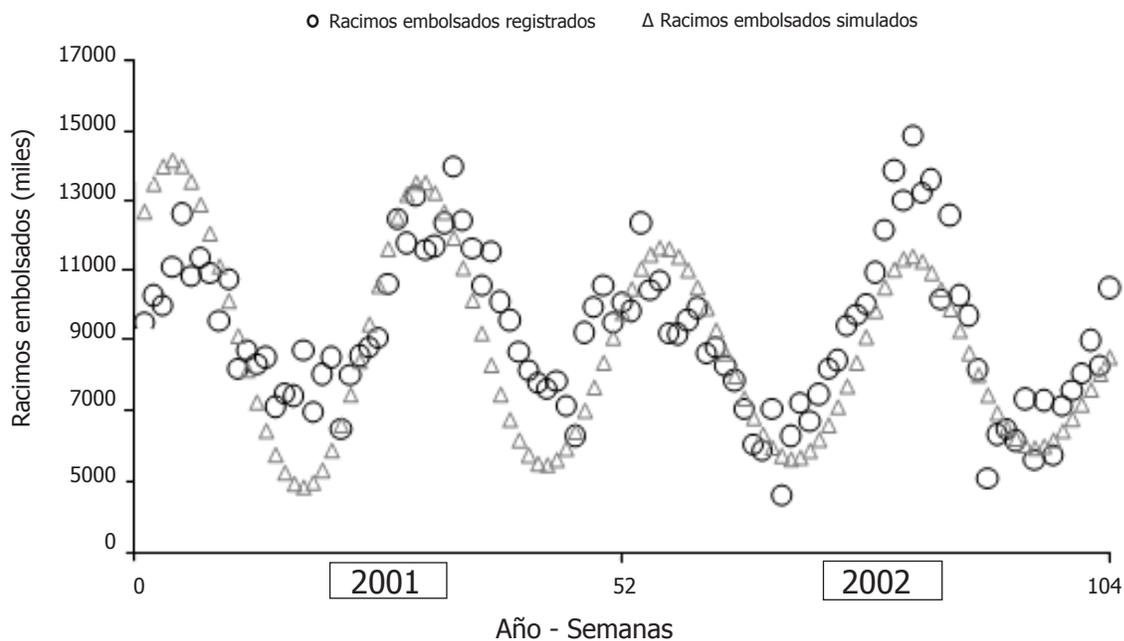


Figura 7. Serie de racimos simulados y registrados para la finca María Rosario, en la zona bananera del Urabá Antioqueño, Colombia.

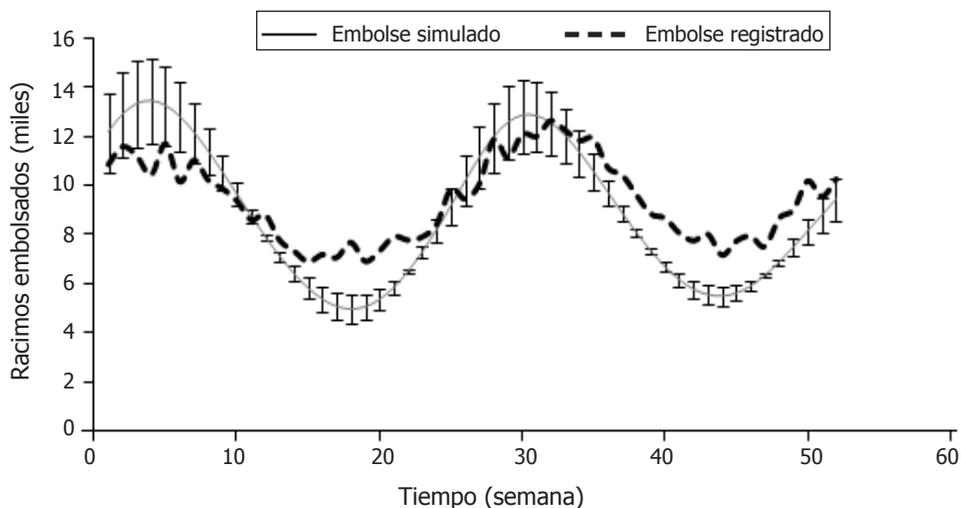


Figura 8. Ciclo anual promedio de embolse simulado y registrado para la finca María Rosario, en la zona bananera del Urabá Antioqueño, Colombia.

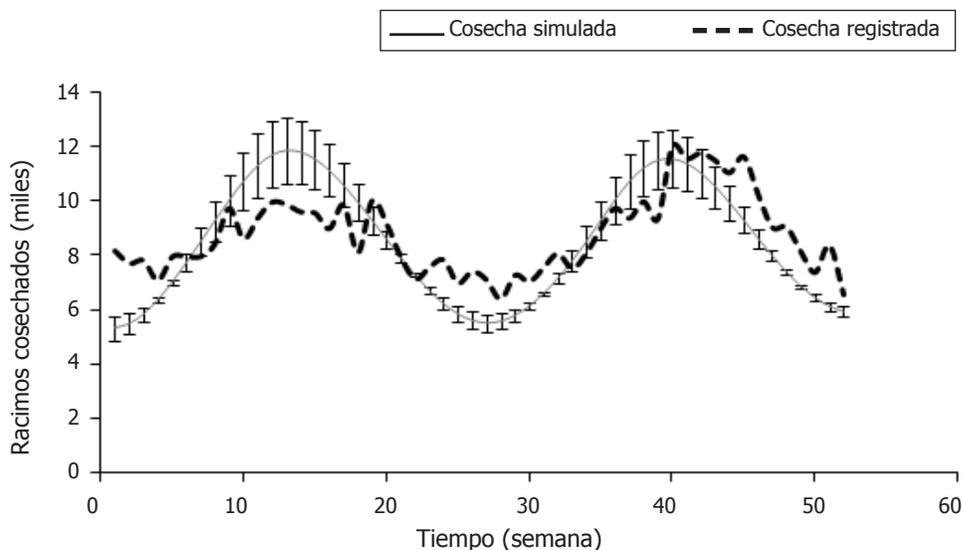


Figura 9. Ciclo anual promedio de racimos cosechados simulados y registrados para la finca María Rosario, en la zona bananera del Urabá Antioqueño, Colombia.

DISCUSIÓN

La calibración y validación del modelo SIMBA-POP, usando solamente la temperatura como variable externa permitió reconocer las buenas capacidades del modelo en la representación de los procesos de selección de rebrotes, florecimiento y cosecha de una plantación comercial de banano en el Urabá Antioqueño; sin embargo, es claro que la dinámica de una plantación comercial de banano está influenciada por otros

factores no tenidos en cuenta aquí. La inclusión de otras variables climáticas como el foto periodo y el balance hídrico del suelo, tal como lo recomiendan recientemente Turner y Fortescue (2010), podría reducir los errores de calibración y validación del modelo así como darle mayor flexibilidad al modelo sobre todo para aplicarlo en otras condiciones y latitudes.

Los modelos de simulación, construidos y calibrados, según el comportamiento físico del sistema a

diferencia de los estadísticos, tienen una mayor importancia y/o ventaja en que pueden emplearse para la simulación en diferentes escenarios de producción. Así el SIMBA-POP, podrá usarse para la simulación de prácticas agrícolas, como el tiempo y selección de rebrotes y estudiar la respuesta de la plantación (Tixier *et al.*, 2004). Pero también, puede utilizarse para estudiar y medir impactos de cambios en las variables climáticas en la dinámica de la plantación (Guarín y Ochoa, 2010). Esta situación es particularmente importante en la administración y proyección de las plantaciones de banano.

Las modificaciones realizadas en la estructura del SIMBA-POP por Ochoa (2010), e incluidas en la programación realizada en Evolución 4.0. Así como el cuidadoso proceso de calibración, en el que se vigiló que las variables físicas de la estructura de la población se conservaran en la simulación, permiten un modelo SIMBA-POP ajustado al real comportamiento de la plantación. El tipo de calibración usada en este trabajo es preferida a uno en el que se encuentre una combinación de parámetros, en el que ajusten las series simuladas y registradas al menor error, lo cual incluso puede resultar en un mejor ajuste, pero puede suceder que no represente rigurosamente el proceso físico de la plantación.

El modelo SIMBA-POP, calibrado y validado bajo las condiciones expuestas, representa una poderosa herramienta para la planificación de un cultivo de banano, particularmente es importante para la simulación en escenarios de cambio en la temperatura ambiental; sin embargo, se debe continuar el trabajo en la inclusión de otras variables como la humedad de suelo, que afectan fuertemente la dinámica de la plantación de banano, con el fin de simular condiciones de estrés hídrico por exceso o déficit, o combinaciones con cambios de temperatura por ejemplo, con el cual se puedan plantear escenarios más cercanos a la realidad de las plantaciones de banano en la zona bananera del Urabá Antioqueño, Colombia.

Se debe continuar con el estudio, programación e implementación del modelo SIMBA en las regiones bananeras, incluyendo todos los submodelos (Tixier *et al.*, 2008). Sin embargo, previo a esta implementación se debe mejorar el modelo SIMBA-POP, siguiendo las recomendaciones de Turner y Fortescue (2010).

CONCLUSIONES

El SIMBA-POP, desarrollado en Martinica, es capaz de reproducir la dinámica poblacional de una plantación de banano en Colombia, utilizando únicamente la temperatura como variable climática.

El modelo SIMBA-POP calibrado y validado en este trabajo para la región de Urabá, corresponde sólo a la dinámica poblacional de una plantación de banano y es sólo un componente del modelo SIMBA. Por ello, es importante continuar con la implementación del modelo, principalmente en los submodelos de acumulación de biomasa, desarrollo del cultivo y balances hidrológico y de nitrógeno. El modelo completo calibrado, será una poderosa herramienta para el diseño de estrategias de optimización en el manejo del cultivo de banano bajo escenarios de prácticas agrícolas y cambios en las variables climáticas.

Para la sostenibilidad de la agricultura es fundamental la implementación de herramientas capaces de simular la dinámica del sistema teniendo en cuenta escenarios de cambio y variabilidad climática. En ese sentido resulta evidente la utilidad de SIMBA-POP para la planificación agrícola de mediano y largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la asesoría técnica del profesor Carlos Alfredo Salazar Molina de la Universidad Nacional de Colombia, el apoyo con información recibida de Banacol a través del Ingeniero Javier Ochoa y la asesoría de John Jairo Mira, Director de Cenibanano. También queremos agradecer el apoyo económico de Colciencias mediante el proyecto "Cambio Climático: Gestión del Riesgo y Sostenibilidad de la Producción de Banano en Colombia", financiado por la Convocatoria Colciencias 502, contrato 720-2011.

BIBLIOGRAFÍA

Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M.H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoulaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J.M. Mchet, J.M. Meynard and R. Delécolle. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomy* 18(5-6): 311-346.

- Cottin, R. 1987. Modélisation de la production bananière. Influence de quelques paramètres en Martinique. *Fruits* 42(12): 691–701.
- Ganry, J. 1978. Recherche d'une méthode d'estimation de la date de récolte du bananier à partir de données climatiques dans les conditions des Antilles. *Fruits* 33(10): 669-679.
- Gauch, H.G., J.T. Gene and G.W. Fick. 2003. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. *Agronomy Journal* 95(6): 1442-1446.
- Guarín, G. y A. Ochoa. 2010. Simulación de escenarios de producción bananera en Urabá (Colombia) según las fases del fenómeno ENSO. pp. 226-232. En: *Memorias. XIX Reunión Internacional para la Cooperación en la Investigación y Desarrollo de las Musáceas (Banano y Plátano)*. ACORBAT Internacional, Medellín.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). 2005. La cadena del banano en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991 - 2005, http://www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/2005112143835_caracterizacion_banano.pdf. 49 p.; consulta: enero 2010.
- Ochoa, A. 2010. Comments on Tixier, P. *et al.*, 2004. "SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest" [*Ecol. Model.* 180, 407–417]. *Ecological Modelling* 221(12): 1648-1648.
- Stöckle, C.O., M. Donatelli and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18: 289-307.
- Tixier, P., E. Malézieux and M. Dorel. 2004. SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecological Modelling* 180: 407-417.
- Tixier, P., M. Dorel and E. Malézieux. 2007. A model-based approach to maximise gross income by selection of banana planting date. *Biosystems Engineering* 96(4): 471-476.
- Tixier, P., E. Malézieux, M. Dorel and J. Wery. 2008. SIMBA, a model for designing sustainable banana-based cropping systems. *Agricultural System* 97: 139-150.
- Turner, D.W. 1994. Chapter 3: Bananas and plantains. pp. 37-64. In: Schaffer, B. and P.C. Andersen (ed.). *Handbook of environmental physiology of fruit crops. Volume II: Sub-tropical and tropical crops*. Editorial CRC Press, Boca Raton, Florida. 293 p.
- Turner, D.W. and J.A. Fortescue. 2010. The physiology of banana (*Musa* spp.) fruit growth-factors that affect bunch initiation. p. 291-296. En: *Memorias. XIX Reunión Internacional para la Cooperación en la Investigación y Desarrollo de las Musáceas (Banano y Plátano)*. ACORBAT Internacional. Medellín.
- Wallach, D. and B. Goffinet. 1989. Mean squared error of prediction as a criterion for evaluating and comparing system models. *Ecological Modelling* 44(3-4): 299-306.