



6. Modelos de simulación en la agricultura

Un modelo es “una representación simplificada de un sistema real”. Estos asumen diferente grado de complejidad en la simulación del sistema, dependiendo de los objetivos a lograr. Su utilidad radica no sólo en reproducir la realidad, sino porque la simplifican y permiten que los procesos más importantes sean identificados, estudiados y pronosticados (Link, 2005; Steduto, 2006; Doorembos y Kassam, 1979; De Wit, 1986).

Un sistema de cultivo es una interacción compleja de varios procesos, un modelo debe incluir tanto los procesos internos como las interacciones con el medio para lograr los objetivos propuestos y simular la máxima producción de materia seca (Milera y Crotti, 2005). Sin embargo entre más procesos internos y/o externos se incluyan la complejidad del modelo será mucho mayor y el proceso de calibración, simulación y validación tendrá un mayor grado de dificultad, consumirá mucho más recursos en hardware y requieren muchos más datos para la calibración. De esta manera un modelo de cultivo, debe ser al mismo tiempo lo bastante complejo y exhaustivo en su concepción, y lo bastante simple y comprensible en sus estructuras cuantitativa, dinámica y mecánica. el modelo puede ser simple y describir solamente un proceso, o puede ser complejo y representar varios procesos y sus interacciones, la fotosíntesis, la fenología, la distribución de biomasa y el carbono, la disponibilidad de agua en el suelo y el crecimiento y desarrollo de la planta en función de los déficit de agua y nitrógeno (Ospina, 2006; Link, 2005).

El número y tipos de modelos de cultivo reportados por la bibliografía es bastante grande y no sorprende que no exista un modelo de cultivo universal que se pueda adaptar a los diferentes sistemas, objetivos, procesos y condiciones ambientales. Existen modelos de simulación de cultivos específicos para un cultivo, por ejemplo para trigo y maíz el CERES-Wheat, CORNGRO, SIMTAG, para banano el SIMBA, o por otro lado pueden ser genéricos. Los modelos genéricos pueden ser aplicados a varias especies mediante la utilización de parámetros específicos para cada cultivo: algunos de estos modelos son DSSAT, DAISY, SOILN, EPIC, WOFOST, CROPSYST, APSIM y STICS (Brisson *et al.*, 1998a, Steduto, 2006), inclusive muchos de estos modelos son de libre acceso y utilización.

Para De Wit (1986), en la construcción de modelos vegetales se pueden realizar dos tipos de acercamiento: uno descriptivo y otro explicativo (mecánico). Según Link (2005), los



modelos pueden ser categorizados en empíricos, mecanísticos, funcionales o modelos orientados en procesos.

Los modelos descriptivos y/o empíricos describen qué pasa, sin preguntarse cómo pasa, lo que resulta en un acercamiento de caja negra, los sistemas y su comportamiento son descritos al mismo nivel al cual las observaciones son hechas. Mediante este acercamiento se identifican términos significantes desde el punto de vista físico del problema y se realiza un proceso estadístico - matemático hasta encontrar relaciones que representen adecuadamente una característica del cultivo con los parámetros escogidos. El inconveniente de este acercamiento es que el modelo ignora la mecánica del funcionamiento biológico y no explica los procesos mediante los cuales la planta responde ante los estímulos externos. Un modelo mecanístico es más complejo que un modelo empírico e intenta describir los posibles mecanismos de los procesos internos y sus interacciones en la vía más fundamental, las relaciones causa – efecto. Este tipo de modelos suministran información de los procesos a través de los cuales son gobernados los fenómenos bajo estudio. Los modelos mecanísticos han sido clasificados como modelos determinísticos y estocásticos. En los modelos mecanísticos, los procesos que ocurren en el sistema forman la base del modelo. Por lo tanto, no suministran el comportamiento del sistema como un todo, sino según el detalle de los subprocesos que son analizados y descritos. El crecimiento del cultivo expresado en este sentido entonces está construido sobre la base del conocimiento de los procesos fisiológicos, físicos y químicos inherentes y el efecto de los factores ambientales sobre estos. La mayor ventaja de los modelos mecanísticos es que ellos pueden ser transferidos a otro conjunto de condiciones, y por lo tanto ofrecen más posibilidades para manipular y mejorar el sistema, lo que lo hace ideal para construir diversos escenarios (De Wit, 1986; Link, 2005). Un modelo de producción de un cultivo que tenga este acercamiento seguramente tendrá submódulos que además de los parámetros climáticos y edáficos incluirá: fotosíntesis, respiración, crecimiento y desarrollo foliar, entre otros. Cada uno de estos submódulos se integra para producir una respuesta, por ejemplo en la incorporación de biomasa (De Wit, 1986; Verdoodt *et al.*, 2004; Link, 2005; Lizaso *et al.*, 2005).

Los modelos funcionales son definidos como modelos que incorporan un acercamiento simplificado para describir los procesos más complejos. Estos modelos no dependen de muchos parámetros y por lo tanto simplifican los procesos descritos mediante un acercamiento mecanístico. Según la simplificación, los modelos funcionales pueden suministrar una simulación tan buena como los modelos mecanísticos (Link 2005; Brisson *et al.*, 1998a; Stöckle *et al.*, 2003). En algunos casos dichas simplificaciones deben asumirse con cuidado, sobre todo cuando dos procesos que pueden comportarse diferente ante un cambio, son reemplazados por un solo parámetro. Lizaso *et al.* (2005) Plantean una solución mediante un módulo de fotosíntesis – respiración para el modelo CERES – Maize, al problema que se presenta con el acercamiento de Monteith (1977), en el que se usa el RUE (radiation use efficiency) para calcular la tasa de crecimiento diaria, ya que la tasa de fotosíntesis y la respiración tienen comportamiento diferente ante cambios en las condiciones climáticas, por ejemplo cambios de temperatura ambiental.



Los modelos basados en procesos fueron desarrollados con la finalidad de simular sistemas complejos, como son los sistemas de cultivos donde existen relaciones con el clima, las prácticas agrícolas, las características del suelo, etc. Por lo tanto este tipo de modelo contiene una combinación de diferentes tipos de modelos (Link, 2005; Stöckle *et al.*, 2003).

En una planta, el crecimiento es caracterizado por los procesos de captura y uso de radiación solar, dióxido de carbono, agua y nutrientes. Por lo tanto, los modelos de crecimiento, poseen un módulo que calcula la producción de biomasa estructural según el uso de la radiación solar, el dióxido de carbono capturado y/o el agua transpirada. El desarrollo fenológico del cultivo está dirigido, principalmente por la temperatura del aire, normalmente representada como duración térmica ($^{\circ}\text{C d}$), proceso que va ligado al desarrollo del área foliar, encargada de capturar la radiación solar y el CO_2 y la partición transpiración-*evaporación*. El crecimiento del cultivo está, entonces, dirigido por la acumulación neta de carbono asimilado por las hojas y transformado en biomasa. La biomasa es distribuida diferencialmente entre los varios órganos de la planta (hojas, raíces, tallo, órganos de almacenamiento), teniendo en cuenta las pérdidas por respiración, acopladas con el desarrollo fenológico y con la disponibilidad de agua y nutrientes capturadas desde el suelo por las raíces. Mientras las hojas asimilan carbono, ellas también pierden agua por transpiración (De Wit, 1986; Steduto, 2006).

El modelamiento de un cultivo, puede hacerse siguiendo tres vías dependiendo de la jerarquía de los procesos y las escalas envueltas: la vía del carbono, la de la radiación y la del agua (transpiración) (De Wit, 1986; Steduto, 2006; Stöckle y Kemanian, 2004).

Un modelo que use la vía del carbono será un modelo del tipo mecanístico; la vía de la radiación y la del agua generalmente tienen un modelo de acercamiento funcional. Según el tipo de relaciones estudiadas las tres podrán ser parte de un complejo modelo basado en procesos.

Las ecuaciones de crecimiento de todos los modelos de cultivo tienen la radiación solar (R_s) como fuerza conductora. Sin embargo, la misma radiación solar es la fuerza conductora primaria del proceso transpiratorio. Ambos procesos: la asimilación del carbono y la transpiración, ocurren a través de la misma vía, los estomas (De Wit, 1986; Steduto, 2006; Stöckle y Kemanian, 2004).

En la vía del agua, existen varios mecanismos y procesos que dan las relaciones entre la asimilación de carbono y la transpiración. Ejemplos del comportamiento de las relaciones entre la transpiración acumulada en el ciclo vegetativo del cultivo, el crecimiento con adecuado suministro de agua y la producción de biomasa se encuentran en Doorembos y Kassam (1979); Allen *et al.* (1998); De Wit (1958); Doorembos (1976); Martin de Santa y De Juan (1993), en general se observa que las máximas producciones se obtienen cuando el cultivo puede transpirar a su máxima tasa, es decir, cuando no se produce cierre de estomas y por lo tanto reducción en la transpiración simultáneamente con la asimilación de CO_2 . Las tasas de estos últimos dos procesos están fuertemente ligadas y por tanto el



cálculo de la transpiración por el dosel del cultivo es una ruta directa para el cálculo de la asimilación del cultivo. Se usa el coeficiente de uso eficiente del agua para relacionar las dos tasas (De Wit, 1986; Steduto, 2006; Stöckle y Kemanian, 2004).

Las tres vías tienen como principal fuerza conductora la radiación solar. La vía del carbono se diferencia de la tomada por la radiación, en el nivel de fraccionamiento de cálculo de los procesos involucrados, hasta obtener la acumulación de biomasa. Mientras la vía del carbono simula los procesos de interceptación y uso de la radiación mediante estratos bien definidos del dosel y calcula las pérdidas por respiración y mantenimiento; la vía de la radiación simula todos los procesos mediante un simple coeficiente llamado uso eficiente de la radiación (ϵ) (RUE, por sus siglas en inglés). La vía de la transpiración ignora la parte izquierda de las figuras, y sigue solo la derecha, calcula la transpiración que posteriormente se relaciona con un coeficiente, similar al RUE, llamado uso eficiente del agua (WUE), para calcular la biomasa acumulada. El WUE, es la simplificación mediante un modelo funcional de un modelo mecánico con varios subprocesos y que representa tres características: El rol de la radiación interceptada en los procesos de transpiración y asimilación, el intercambio de gases CO_2 y vapor de agua y la proporcionalidad entre la asimilación y la producción.

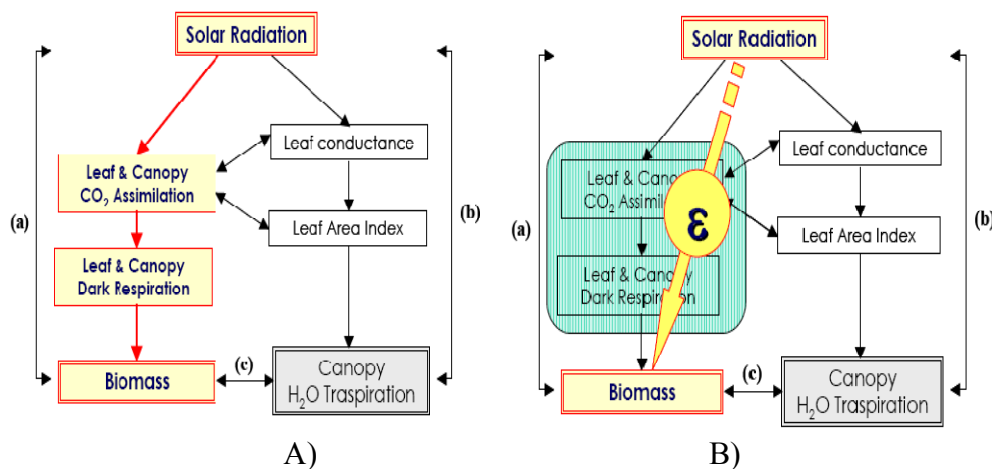


Figura 6.1: Modelamiento siguiendo: A) La vía del carbono y B) La vía de la radiación. La integración de las parte (b) y (c) de cada figura indica la vía transpiratoria (Steduto, 2006).

Por lo tanto el uso del coeficiente (RUE), ϵ en la figura 6.1, es un modelo de tipo funcional simplificado del modelo mecánico de la vía del carbono.

En simbología de simulación dinámica los acercamientos a la simulación de un cultivo según las limitaciones sean la luz o el agua pueden ser representados por los siguientes esquemas:

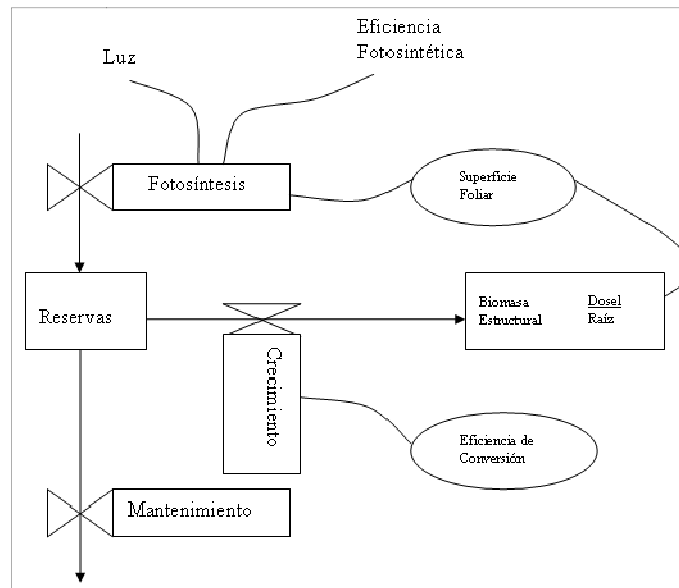


Figura 6.2: Diagrama simplificado de producción cuando la luz es el factor limitante (De Wit, 1986)

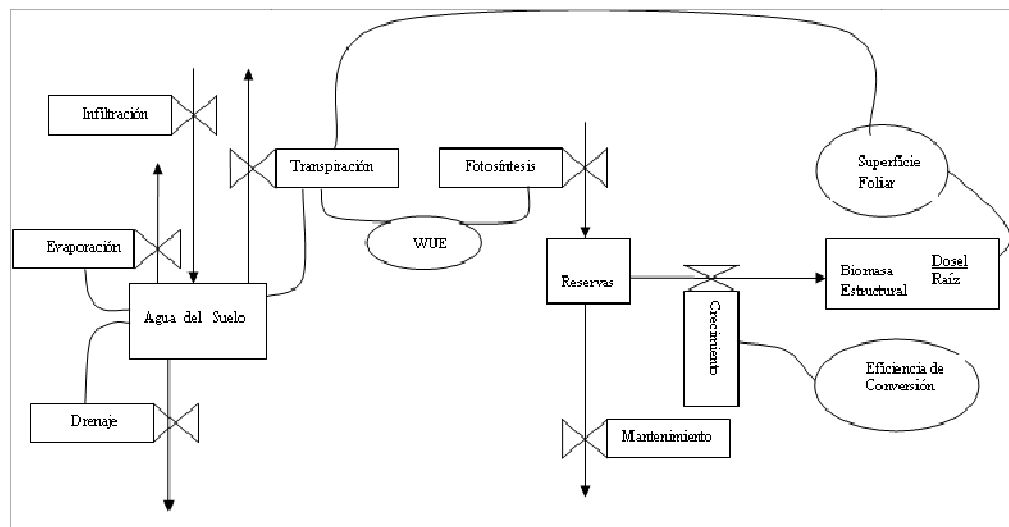


Figura 6.3: Diagrama simplificado de producción cuando el agua es el factor limitante (De Wit, 1986)

Para realizar el modelamiento de la producción de un cultivo generalmente se parte de una condición ideal, donde un cultivo, bien adaptado a unas condiciones climáticas de una región pueda expresar su máxima producción. Dicho rendimiento máximo viene determinado principalmente por las características genéticas y por la buena adaptación del cultivo al ambiente predominante. Las necesidades ambientales de clima, suelo y agua para un crecimiento y rendimiento óptimo varían con el cultivo y la genética de éste (Doorembos y Kasam, 1979).



El rendimiento máximo de un cultivo se define como el rendimiento cosechado de una variedad de gran producción, bien adaptada al ambiente vegetativo de que se trate, incluyendo el tiempo disponible para llegar a su madurez, en condiciones tales que su rendimiento no esté limitado por el agua, los nutrientes, las plagas o las enfermedades. En esta situación la producción sólo estará determinada por el tipo de cultivo, la radiación y la temperatura ambiental. La cantidad de lluvia y su distribución y las propiedades físicas y químicas del suelo, como es de suponerse, no son de interés. (Doorembos y Kasam, 1979; De Wit 1986).

Luego que se calcula este rendimiento máximo, se inicia un proceso de “castigo” para condiciones no ideales, que según la medida en que se presenten condiciones limitantes, ya sea por agua, nutrientes, enfermedades u otras, representará una disminución de ese valor de rendimiento máximo.

Para Van Ittersum *et al.* (2003), en el modelamiento de un cultivo lo que más interesa es simular el crecimiento, la producción y la respuesta del cultivo a las diferentes alternativas de manejo. En este sentido se consideran 4 niveles:

- Producción potencial (Rendimiento máximo)
- Producción limitada por agua.
- Producción limitada por nitrógeno.
- Producción limitada por otros factores de estrés (deficiencia de nutrimentos, plagas, enfermedades, arvenses).

En esta dirección, en la figura 6.4 se muestra el diagrama para el cálculo de la producción (acumulación de biomasa) para el modelo CROPSYST, siguiendo las vías de la radiación y la transpiración y las reducciones causadas por limitaciones en el agua (transpiración) o nitrógeno (Stöckle *et al.*, 2003).

Un diagrama similar presenta el modelo STICS para el cual el cultivo se caracteriza globalmente por su biomasa aérea (carbono y nitrógeno), su índice foliar así como el número y la biomasa (carbono y nitrógeno) de los órganos cosechados. El crecimiento se simula por el balance de carbono, esto es, intercepción de la radiación solar por las hojas, luego transformación en biomasa aérea y, durante la fase final del ciclo, en órganos para ser cosechados. Dado que el balance de nitrógeno depende parcialmente del balance de carbono, ambos se simulan al mismo tiempo. Un índice térmico, ajustado eventualmente para efectos fotoperiódicos y de vernalización según el tipo de planta, controla el desarrollo del cultivo. La posibilidad de estrés hídrico o por nutrientes se tiene en cuenta mediante tres índices que pueden reducir el crecimiento de la hoja y la eficacia de uso de la radiación cuando los nutrientes son limitados. Estos índices se computan en los balances de agua y nitrógeno (Brisson *et al.*, 1998a).

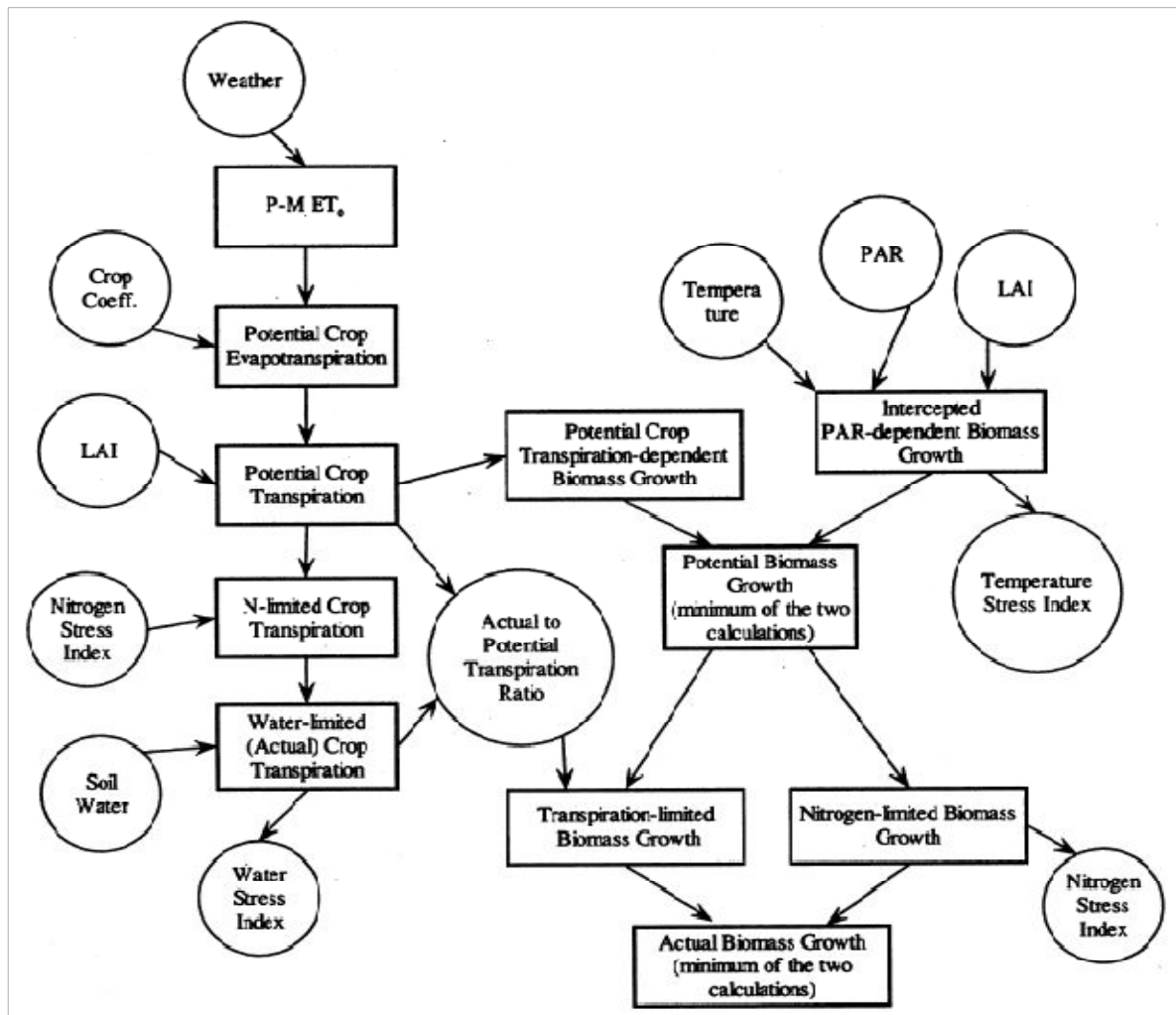


Figura 6.4: Flujo del cálculo para acumulación de biomasa en Cropsyst (Stöckle *et al.*, 2003).

6.1 Modelo STICS

Es un modelo genérico. Aunque originalmente fue diseñado para cereales, puede ser adaptado a muchos otros cultivos. El modelo posee una serie de ecuaciones genéricas que representan los diferentes procesos que ocurren en la planta y sus relaciones con el cultivo. Dichas ecuaciones están parametrizadas y por lo tanto las diferencias en el comportamiento de los cultivos dependen de los parámetros utilizados. Si el cultivo está parametrizado los datos de entrada solo serán datos de clima, suelo y condiciones de manejo. El software permite ingresar los datos con facilidad y es bastante flexible debido a su presentación modular y genérica, permitiendo que cada módulo represente un proceso o grupo de procesos que ocurren en el sistema suelo cultivo. Opera a una escala de tiempo diaria y simula la influencia del clima en el crecimiento y desarrollo del cultivo, interrelacionado con las simulaciones de balances de carbono, nitrógeno y agua del sistema suelo – planta – atmósfera para diversas prácticas agrícolas (Brisson *et al.*, 1998a).



STICS en su componente de cultivo está basado en tres tipos de funciones (Brisson *et al.*, 1998; Flénet *et al.*, 2004; Tournebize *et al.*, 2003):

- Una función que define mediante un calendario fisiológico los estados de crecimiento. Se usa un índice térmico (grados – día) para indicar el paso entre los diferentes estados de desarrollo según la especie.
- Las funciones de crecimiento de cultivo (área foliar, absorción de luz, conversión de luz absorbida y partición a grano) dependen de las variables climáticas (temperatura y radiación)
- Funciones para simular los efectos tanto de estrés hídrico como por nitrógeno. Estas funciones requieren información sobre desarrollo radicular para acceder a los recursos agua y nitrógeno.

Que se representan en siete módulos: desarrollo, crecimiento, componentes de la cosecha, desarrollo radicular, balance de agua, ambiente térmico y balance de nitrógeno:

- El módulo de desarrollo describe el crecimiento del cultivo y el intervalo entre diferentes estados en función de la acumulación de grados temperatura.
- El módulo de crecimiento del dosel simula la evolución del LAI en cuatro fases: dos fases de crecimiento, una fase de estabilidad y una fase de senescencia. El LAI es el parámetro que permite calcular la radiación interceptada por el cultivo. Este módulo, simula el LAI y la conversión de radiación a biomasa.
- Componentes de la cosecha: la materia seca y el nitrógeno acumulado en los granos o elemento cosechado es calculado con índices de cosecha.
- Crecimiento radicular: El crecimiento radicular se asume independiente del crecimiento aéreo y se calcula por la partición de la biomasa acumulada mediante fotosíntesis, pero está limitada por la especie, la temperatura y el estado de humedad del suelo.
- Balance de agua: el modelo usa precipitación y evapotranspiración para calcular el balance de agua. La evapotranspiración es calculada con la ecuación de Penman Monteith y está limitada según el estado de humedad del suelo y el estado energético de la atmósfera. Se tiene un índice de estrés hídrico para incluir el efecto de dicho estrés en el crecimiento potencial.
- Ambiente Térmico del Cultivo: Este ambiente es simulado según la temperatura del suelo. La temperatura del cultivo es calculada por medio un simple balance de energía en una escala de tiempo diaria. Este balance toma en cuenta las condiciones atmosféricas.
- Balance de Nitrógeno: La mineralización de nitrógeno se asume que proviene de tres fuentes como degradación de materia orgánica: materia orgánica humificada, residuos de cosecha y biomasa microbiana.



6.2 Modelo CROPSYST

Al igual que el STICS el CROPSYST (Cropping Systems Simulation Model), es un modelo genérico que simula muchos procesos que gobiernan la relación entre clima, cosecha, suelo y manejo del cultivo. Pueden realizarse simulaciones por varios años e incluir sistemas de -cultivo, los cuales son simulados a una escala diaria. Ha sido desarrollado con una interface amigable, tiene un link a software GIS (ArcGIS) que permite controlar la variabilidad espacial, al menos siguiendo un formato tipo vector, con la creación de polígonos con propiedades diferentes, adicionalmente posee un generador de datos climáticos llamado Climgen (Stöckle *et al.*, 2003)

CropSyst simula sobre un área unitaria, el balance hídrico y de nitrógeno en el suelo y planta, la fenología del cultivo, el dosel y el crecimiento radicular, la producción de biomasa, la cosecha, la producción y descomposición de residuos, la erosión hídrica y destino de pesticidas. Cada uno de estos procesos es afectado por el clima, las características del suelo y del cultivo, las practicas de manejo del cultivo (riego, fertilización labranza).

El suelo es simulado mediante 5 compartimentos cada uno con sus propiedades características. Este modelo difiere con el STICS en que el movimiento del agua al interior del estrato se realiza con la ecuación de Richard resuelta mediante diferencias finitas.

Tanto el STICS como el CROPSYST son modelos gratuitos.

6.3 Modelo DSSAT

Es un modelo comercial, en el cual se integran en una misma plataforma, modelos específicos desarrollados independientemente para cada uno de los cultivos disponibles. De esta manera encontramos integrados por ejemplo modelos como CERES, SOYGRO y PNUTGRO, que permiten simular maíz, soya y maní respectivamente, pero también integra modelos para papa, arroz, caña, girasol, entre otros.

Es posible abordar el análisis de monocultivos, en los cuales se pueden simular condiciones de rotación, interacciones con factores bióticos y abióticos entre otros. El programa está compuesto de 5 sub-programas, cuyo centro son los **modelos de cultivo** y que se relacionan con la **bases de datos** de clima, suelo, genética entre otras, **el software de soporte, aplicaciones** que incluyen relación con GIS y análisis estadísticos y finalmente la **interface con el usuario** (Jones *et al.*, 2003).

El asincronismo de las plantaciones de banano, limita el uso de modelos genéricos tales como el STICS, el CROPSYST o el DSSTA para la simulación del cultivo, sus características y la producción.



Características de una plantación de banano que se deben tener en cuenta para la modelación:

- Los principales estados de desarrollo del banano incluyen aparición del rebrote, crecimiento, floración y cosecha.
- La reproducción de la planta en campo es por rebrote que posteriormente es seleccionado por el agricultor mediante la labor cultural llamada desmache. Esta secuencia puede ser repetida hasta por 50 generaciones más, de esta manera el cultivo puede considerarse multianual.
- Cada una de las nuevas plantas se desarrolla a su propio ritmo y no sigue un ciclo sincrónico. Entonces, en algún momento dado, un cultivo de banano consiste de una población de plantas individuales en distintos estados de desarrollo.
- La heterogeneidad en las etapas de desarrollo de las plantas en el cultivo es debida a fenómenos fisiológicos, heterogeneidad espacial del suelo, prácticas culturales o reemplazos debidos a condiciones ambientales.
- Para simular la producción de un cultivo de banano es necesario considerar la heterogeneidad espacial que presenta la plantación, espacialmente a partir de la segunda cosecha.
- Según *Tixier et al. (2004)*; *Ganry (1978)*; *Cottin et al. (1987)* la distribución de la emergencia de rebrotes y la floración en el campo es bien descrita con una función log-normal.
- El efecto de la variabilidad climática, por ejemplo precipitación, en la producción es función de la intensidad con que se presente dicha variación y el estado de desarrollo del cultivo en la cual se presente.

6.4 Modelo SIMBA

En un cultivo de banano, cada planta se desarrolla a su propio ritmo y no sigue un ciclo sincronizado. Una población homogénea desde plantación se convierte en una población heterogénea luego de unos pocos ciclos, con plantas en diferente estado de desarrollo al mismo tiempo en el campo. Este proceso tiene un fuerte impacto en la dinámica de la cosecha, agua, nitrógeno, cobertura del suelo y plagas asociadas.

SIMBA es un complejo grupo de sub – modelos sincronizados que interaccionan entre si y que fue creado y programado por *Tixier et al. (2004)* en el software STELLA® (Labanon, NH, USA). El modelo corre a una escala de tiempo semanal y como escala espacial fue desarrollado a nivel de parcela. El clima (lluvia, temperatura, radiación solar) y las propiedades del suelo son parámetros de entrada necesarios para correr el modelo. Las características climáticas y del suelo se combinan con reglas de decisión que describen las prácticas agrícolas según el calendario y que son representadas mediante variables de control y umbrales normalmente asociados a una acumulación de temperatura. (*Tixier et al., 2008*)



SIMBA incluye sub-modelos que simulan el crecimiento (SIMBA-GROW), estructura de la población (SIMBA-POP), propiedades físicas del suelo (SIMBA-SOIL), balance de agua (SIMBA-WAT), densidad de población de nematodos (SIMBA-NEM), dinámica del nitrógeno en el suelo (SIMBA-N).

Los módulos biofísicos (figura 6.5) tienen variables de estado como salidas, que suministran información de entrada para calcular indicadores de riesgos ambientales: Rpest para la exposición del agua a pesticidas (Tixier *et al.*, 2007), Rero para calcular la erosión y Rfert para la calidad física, química y biológica del suelo.

SIMBA-GROW calcula el crecimiento separadamente para cada estado fenológico (cohorte). El área foliar potencial y la producción de biomasa son calculadas usando las unidades de calor acumuladas por cohorte. Los diferentes tipos de estrés tanto bióticos como abióticos son simulados con los sub-modelos SIMBA-SOIL, SIMBA-WAT, SIMBA-N, SIMBA-NEM que se complementan y realimentan entre sí y con los módulos SIMBA – POP y SIMBA GROW para calcular el efecto del estrés por deficiencias en nitrógeno, sequía o parásitos (nematodos) que ocasionan una reducción en el crecimiento potencial de las plantas incluidas en una cohorte.

El modelo SIMBA puede esquematizarse en la siguiente figura:

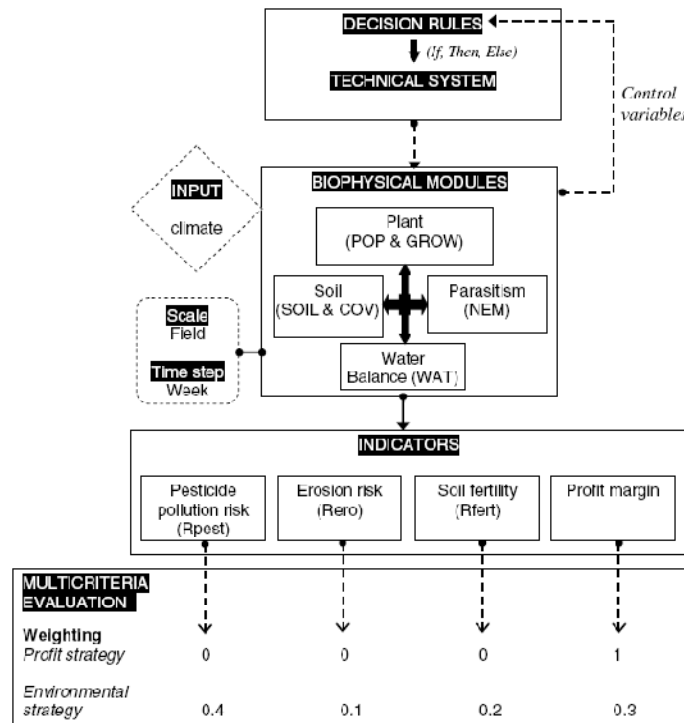


Figura 6.5: Diagrama del modelo SIMBA. (Tixier *et al.*, 2008)

De esta manera siguiendo los 4 niveles indicados por Van Ittersum *et al.* (2003), para el modelamiento de un cultivo cualquiera:

- Producción potencial (Rendimiento máximo)



- Producción limitada por agua.
- Producción limitada por nitrógeno.
- Producción limitada por otros factores de estrés (deficiencia de nutrientes, plagas, enfermedades, arvenses).

Y lo reportado por [Tixier *et al.* \(2004\)](#); [Tixier *et al.* \(2008\)](#). La simulación de un cultivo de banano mediante el concepto de cohortes y cadenas de cohortes podría esquematizarse en la figura 6.6, en la cual la producción potencial es calculada sin ningún tipo de estrés y para las condiciones climáticas de la región donde se pretende simular el cultivo.

El modelo de población también interactúa con las condiciones ambientales (temperatura, precipitación, fotoperiodo, viento etc.) que causan un retraso, adelantamiento, disminución en la población por cohorte.

Bajo condiciones no óptimas, es decir, cuando ocurre algún tipo de estrés, existe un efecto sobre la producción potencial que se refleja en una disminución según la gravedad y la época de ocurrencia del evento estresante (cohorte).

La producción real representada por la acumulación de materia seca por la población de una cohorte luego se corrige a la producción comercial mediante un coeficiente de cosecha que indica la proporción de la materia seca acumulada por la planta que es comercial (racimo).

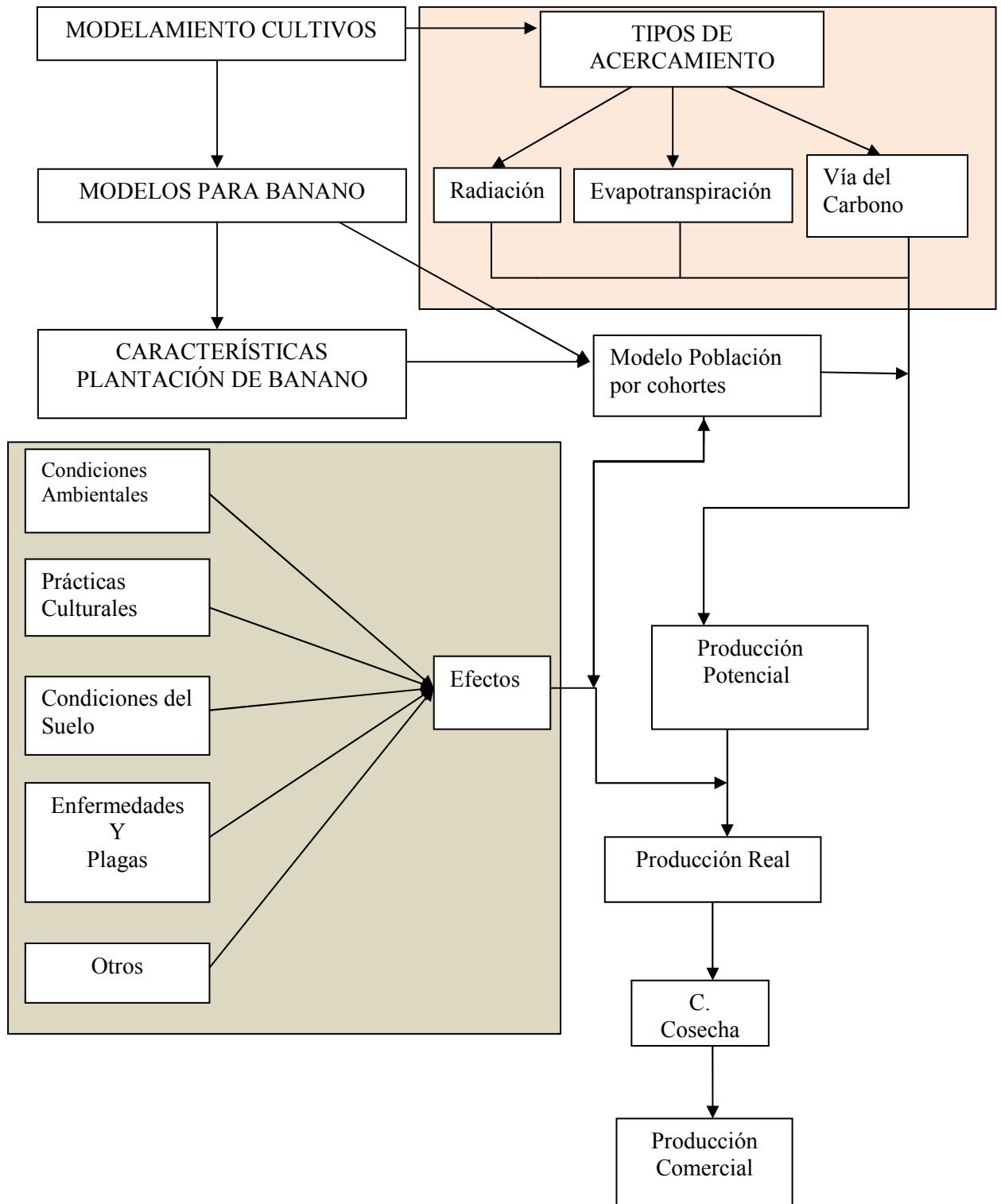


Figura 6.6: Esquema para la simulación de la producción de Banano.



7. Información recopilada y utilizada

Reconociendo las complejas interacciones que ocurren entre las variables climáticas y la producción agrícola, al estudiar esta dependencia, es de suma importancia poseer la mayor cantidad de información de calidad, de las variables climáticas, índices de enfermedades, producción, estado del cultivo, entre otras.

Para el desarrollo del trabajo se recopiló y procesó la siguiente información:

7.1 Modelo digital de terreno

Se obtuvo un modelo digital de terreno con resolución de 30 m x 30 m. El modelo es construido por la NASA y puede descargarse desde la página web <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> Se descargaron las imágenes correspondientes a la zona bananera y posteriormente estas imágenes fueron procesadas con el software ARGIS 9.3.

7.2 Características de los suelos

A partir de la publicación en 2007 del estudio semidetallado de suelos de áreas potencialmente agrícolas en la zona de Urabá realizado por Instituto Geográfico Agustín Codazzi, se realizó una digitalización en ARGIS 9.3 a nivel de consociación de la distribución de los diferentes tipos de suelo. Adicionalmente se recopiló información según estudio detallado de suelos de 10 fincas pertenecientes a la compañía C.I. Banacol S.A.

7.3 Variables Macroclimáticas

Se construyó una base de datos a escala mensual de variables macroclimáticas para analizar la influencia de las condiciones atmosféricas y oceánicas (Océanos Pacífico y Atlántico) sobre la precipitación mensual en la zona del Urabá Antioqueño. La base de datos incluyó las series de tiempo de las variables: MEI, NAO, ONI, SOI, temperatura superficial del Atlántico Norte (sst_atlann), temperatura superficial del Atlántico Sur (sst_atlans), temperatura superficial en la región Niño 1-2 (sst_niño1_2), temperatura



superficial en la región Niño 3-4 (sst_niño3_4). Con estas variables y las series de precipitación mensual se calculó el coeficiente de correlación lineal hasta con 20 rezagos con el fin de identificar la dependencia lineal de las series de precipitación con las variables macroclimáticas analizadas. Cuando fue necesario se estandarizó la serie antes de realizar el cálculo del coeficiente de correlación lineal con la serie estandarizada de precipitación mensual.

7.4 Variables climáticas

Se recopiló información de variables climáticas de estaciones o instrumentos distribuidos latitudinal y longitudinalmente en el eje bananero del Urabá Antioqueño. La información se recopiló de entidades como el IDEAM, C.I Banacol S.A, y CENIBANANO.

- En total se recopiló información de precipitación de 32 fincas de la empresa C.I Banacol S.A. a escala semanal y por el periodo comprendido entre los años 2002-2009.
- Se recopiló información de precipitación de 24 estaciones del IDEAM, a escala mensual con periodos de registro que van desde 5 años hasta 75 años.
- Se recopiló información de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, evaporación, horas sol, precipitación, temperatura de bulbo seco y húmedo, punto de rocío y tensión de vapor a escala diaria de las estaciones Tulenapa y los Cedros suministrada por CENIBANANO, para el periodo comprendido entre los años 01/01/1995 y 31/12/2003.
- Se recopiló información de Temperatura Máxima y Temperatura Mínima a escala diaria de 13 fincas de la empresa C.I Banacol S.A y por el periodo comprendido entre los años 2002-2009.

7.5 Variables de Producción

Se recopiló información de cajas exportadas, ratio y embolse semanal para diez fincas distribuidas latitudinal y longitudinalmente en el eje bananero y pertenecientes a la compañía C.I Banacol S.A.

Se obtuvo información de cajas exportadas por mes de todo el eje bananero del Urabá antioqueño para el periodo comprendido entre enero de 1990 y diciembre de 2008.

Adicionalmente se obtuvo información de la incidencia de la Sigatoka Negra en el cultivo de banano cuantificada mediante los índices YLS y YWLS a escala semanal durante el periodo 2002 – 2008 para las diez fincas estudiadas.

Se obtuvieron mapas planimétricos de las fincas estudiadas donde se consultó información relacionada con el área bruta de la finca y área neta del cultivo, así como información del estado actual del sistema de drenaje y la presencia o no de sistema de riego.



Tabla 7-1: Resumen de la información de producción y características de las fincas suministradas por la empresa C.I Banacol S.A.

Item	Información requerida	Periodicidad	Longitud de los datos	Comentarios
1	Variedad de banano cultivada (lote)	---	---	Tipo de variedad de las 39 fincas de Urabá.
2	Total cajas producidas (por finca)	Semanal	1999 - 2008	Actualizado a la semana 22. 10 fincas.
3	% Racimos rechazados (por finca)	Semanal	2001 - 2008	Actualizado a la semana 22. 10 fincas.
4	% Cajas rechazadas (por finca)	Semanal	2004 - 2008	Actualizado a la semana 22. 10 fincas.
5	Ratio total (por finca)	Semanal	1999 - 2008	Actualizado a la semana 22. 10 fincas.
6	Racimos embolsados (por lote)	Semanal	2001 - 2008	Actualizado a la semana 23. 10 fincas.
7	Nivel freático (por lote)	Semanal	2001 - 2008	Actualizado a la semana 22. 10 fincas.
8	Indicadores Sigatoka – YLWS, YLS (por finca)	Semanal	2004 - 2008	Actualizado a la semana 22. 10 fincas.
9	Análisis Foliar	Anual	2006 - 2007	10 fincas.
10	Análisis Suelos	Anual	2006 - 2007	10 fincas.
11	Racimos Repicados (por finca)	Semanal	2001 - 2008	Actualizado a la semana 22. 10 fincas.
12	Fincas con riego	---	---	
13	Estudio de Suelos	---	---	Mapas en power point 10 fincas
14	Mapas autocad	---	---	Mapas en autocad. 10 fincas

Las fincas analizadas fueron: Rita María, Rancho Amelia, Doña Ángela, María Rosario, Cafetal, Porfrancia, Diamante, Banafinca, Alameda, Paraíso

Con la información recopilada se creó una base de datos en Argis 9.3 con el fin de realizar un análisis espacio – temporal de los datos.



8. Modelamiento de una plantación de banano SIMBA-POP

Uno de los principales limitantes para la simulación de una plantación de banano, radica en la dificultad de representar su dinámica poblacional. **En un tiempo dado, una plantación establecida de banano se compone de plantas individuales en diferentes estados de desarrollo.** Los modelos de cultivo genéricos, tales como CROPSYST (Stöckle *et al.*, 2003) o STICS (Brisson *et al.*, 1998a), en su mayoría, se desarrollaron para cultivos anuales en los cuales existen fechas claras de siembra, floración y cosecha para toda la población, dichos modelos son limitados para su uso en el modelamiento de una plantación de banano, debido a que no consideran el asincronismo de la plantación.

Algunos acercamientos a la simulación de una plantación de banano se han realizado por Mekwatanakarn (1987) reportado por Tixier *et al.* (2004), con un concepto de planta media, Mekwatanakarn y Turner (1989) con su modelo de tasa de producción de hojas de banano en los subtrópicos, o Bruin (1990) quien desarrolló un modelo mecanístico para simular la fotosíntesis del banano. Brisson *et al.* (1998b) quienes simularon el efecto del manejo del suelo y el régimen hídrico en el crecimiento de una plantación de banano entre establecimiento y florecimiento usando el modelo STICS, Wommer *et al.* (1998) que simularon el crecimiento del banano y las dinámicas de la materia orgánica del suelo usando el modelo Century. Como resultado de su tesis doctoral, Tixier (2004), desarrolló el paquete SIMBA, un modelo complejo para simular los diferentes procesos fisiológicos de una planta de banano así como la dinámica de la plantación y sus interacciones con factores bióticos y abióticos. La estructura de la población de bananos en una plantación está representada por el modelo SIMBA – POP.

Tixier *et al.* (2004), ilustra el modelo SIMBA-POP, como una herramienta para modelar la dinámica poblacional de una plantación de banano. El modelo fue desarrollado a partir del concepto de la dinámica de una población por cohortes. Una cohorte es definida 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 (Fisiológicos, estocásticos, etc.)

Una cadena de cohortes permite simular el paso entre los diferentes estados fisiológicos sucesivos de una planta de banano en desarrollo, tales como: crecimiento del cormo, iniciación de la inflorescencia, emisión de rebrotes, cosecha del racimo y muerte de la



planta principal. Mientras que una cohorte representa un número de plantas que se encuentran en un mismo estado de desarrollo en una semana dada (Tixier *et al.*, 2004)

La figura 8.1 ilustra la estructura matemática del modelo. SIMBA-POP está compuesto de dos cadenas de cohortes separadas por el momento de la floración de la planta de banano. La primera cadena, llamada cadena de pre-floración incluye las diferentes etapas (semanas), que ocurren desde el establecimiento de la plantación hasta la floración. Las plantas florecidas pasan a la primera cohorte de la segunda cadena de cohortes, la cual finaliza con el momento de la cosecha del racimo. Esta última cadena de cohortes es llamada cadena de post-floración.

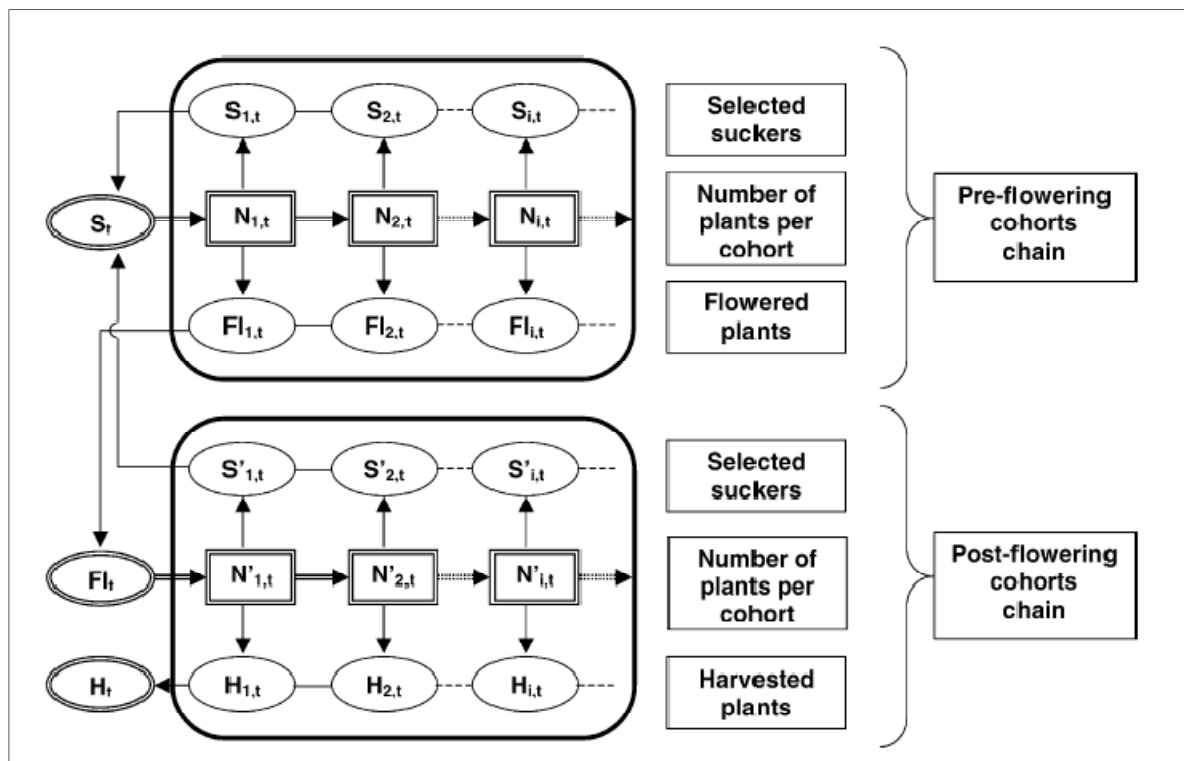


Figura 8.1: Estructura de cohortes del SIMBA-POP. (Tixier *et al.*, 2004)

En la figura:

$S_{i,t}$: Rebrotos seleccionados en la cohorte i , en la semana t para la cadena de pre-floración.

$S'_{i,t}$: Rebrotos seleccionados en la cohorte i , en la semana t para la cadena de post-floración.

$N_{i,t}$: Numero de plantas en la cohorte i , en la semana t . para la cadena de pre-floración.

$N'_{i,t}$: Numero de plantas en la cohorte i , en la semana t . para la cadena de post-floración.

$Fl_{i,t}$: Plantas florecidas en la cohorte i , en la semana t .

$H_{i,t}$: Racimos cosechados en la cohorte i , en la semana t .

S_t : Total de rebrotos seleccionados en la semana t .

Fl_t : Total de plantas florecidas en la semana t .

H_t : Total de racimos cosechados en la semana t .



En el modelo, el movimiento de plantas entre cohortes está determinado por el paso de tiempo t , semana, y por leyes fisiológicas y/o estocásticas, SIMBA-POP asume una plantación sin limitantes de agua, sin daños por parásitos y/o huracanes y considera la temperatura media como única variable externa. Con la temperatura media se calcula la acumulación de unidades térmicas (grados-día) por cohorte, que al alcanzar ciertos umbrales determinan el inicio y/o paso entre estados fisiológicos. El asincronismo típico de una plantación de banano se incorpora en el modelo con leyes estocásticas del tipo: (Ganry, 1978; Cottin, 1987).

$$s_{i,t} = af \times \exp\left(-0,5 \left(\frac{\ln(wf_{i,t}/bf)}{cf}\right)^2\right) \quad (1)$$

$$fl_{i,t} = af \times \exp\left(-0,5 \left(\frac{\ln(wf_{i,t}/bf)}{cf}\right)^2\right) \quad (2)$$

Donde:

$s_{i,t}$: es la tasa de selección de rebrotes.

$fl_{i,t}$: es la tasa de floración.

af, bf, cf: son los parámetros de calibración de las ecuaciones de rebrote y floración. En la ecuación de selección de rebrotes representan las prácticas de manejo de la plantación. En la ecuación de floración representan el ritmo al cual las plantas florecen.

Wf_{i,t}: Representa el número de semanas desde que ocurre el primer florecimiento o el primer rebrote para una cohorte dada.

La cosecha ocurre cuando los racimos alcanzan cierto grado de madurez (grados – día).

La tasa de cosecha para una cohorte depende de las condiciones de mercado (lugar de destino), para el caso del Urabá Antioqueño una vez se alcanza la madurez fisiológica del racimo (edad desde florecimiento), se cosecha de 9, 10, 11, 12 y 13 semanas, dependiendo de si el banano se dirige al mercado Asiático, Europeo o Norteamericano. El modelo original, representa la tasa de cosecha para una cohorte por un histograma de 3 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%.

Los umbrales (unidades térmicas), que indican el inicio de una nueva etapa fisiológica, rebrote, floración o madurez fisiológica del racimo, para el modelo original son:

BT: Umbral de unidades térmicas que da inicio a la selección de rebrotes en una plantación recién establecida. En la calibración realizada por Tixier *et al.* (2004) tiene un valor 2190 grados-día. Cuando una cohorte alcanza este umbral, la tasa de selección de rebrotes está determinada por la ecuación (1).

FT: Umbral de unidades térmicas que da inicio a la floración. En la calibración realizada por Tixier *et al.* (2004) tiene un valor 2350 grados-día. Cuando una cohorte alcanza este umbral, la tasa de floración está determinada por la ecuación (2).

HT: Umbral de unidades térmicas que indica que un racimo ha alcanzado su madurez para cosecha. Su valor se ha determinado en 900 grados – día. (Ganry, 1978). Cuando una cohorte alcanza este umbral, la cosecha se realiza siguiendo el histograma de 3 semanas antes descrito.



La temperatura mínima a la cual se detiene el desarrollo de una planta de banano, depende de las condiciones ambientales, del estado de desarrollo de la planta, de la variedad. Para el modelo se usó un valor de 14 °C. (Turner, 1994; Brisson y Dorel, 1998; Tixier *et al.*, 2004)

De esta manera la temperatura acumulada en una semana para todas las cohortes, se determina con la siguiente ecuación:

$$SUMT_t = \sum_1^7 DDT_d \quad (3)$$

Donde:

SUMT_t: Unidades térmicas acumuladas en la semana t. (grados-día)

DDT_d = Unidades térmicas acumuladas en un día de la semana.

$$DDT_D = (T_d - T_{Banano}) \quad (4)$$

Donde:

T_d: Temperatura Media diaria (°C)

T_{Banano}: 14 °C.

8.1 Construcción del modelo SIMBA-POP modificado en EVOLUCION 4.0

La programación del SIMBA – POP se realizó siguiendo el diagrama que se muestra en la figura 8.2 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 rebrotes, y el número total de plantas florecidas por semana, las cuales pasan a la cadena de cohortes de postfloración.

La parte inferior representa la cadena de cohortes de postfloración. Esta cadena inicia la simulación una vez ingresen plantas florecidas provenientes de las diferentes cohortes existentes en la cadena de prefloración. Una nueva cohorte es creada con las plantas florecidas que ingresan en una semana t, se inicia un nuevo conteo de temperatura para contabilizar las unidades térmicas necesarias para la maduración y cosecha de los racimos. Puede ocurrir que un grupo de plantas florecidas no hayan culminado el proceso de selección de rebrotes en la cadena de prefloración, por lo tanto se diseñó un flujo adicional de cohortes, continuación del flujo de la cadena de cohortes de prefloración, que permite continuar con la selección de rebrotes para las cohortes que no han culminado el proceso.

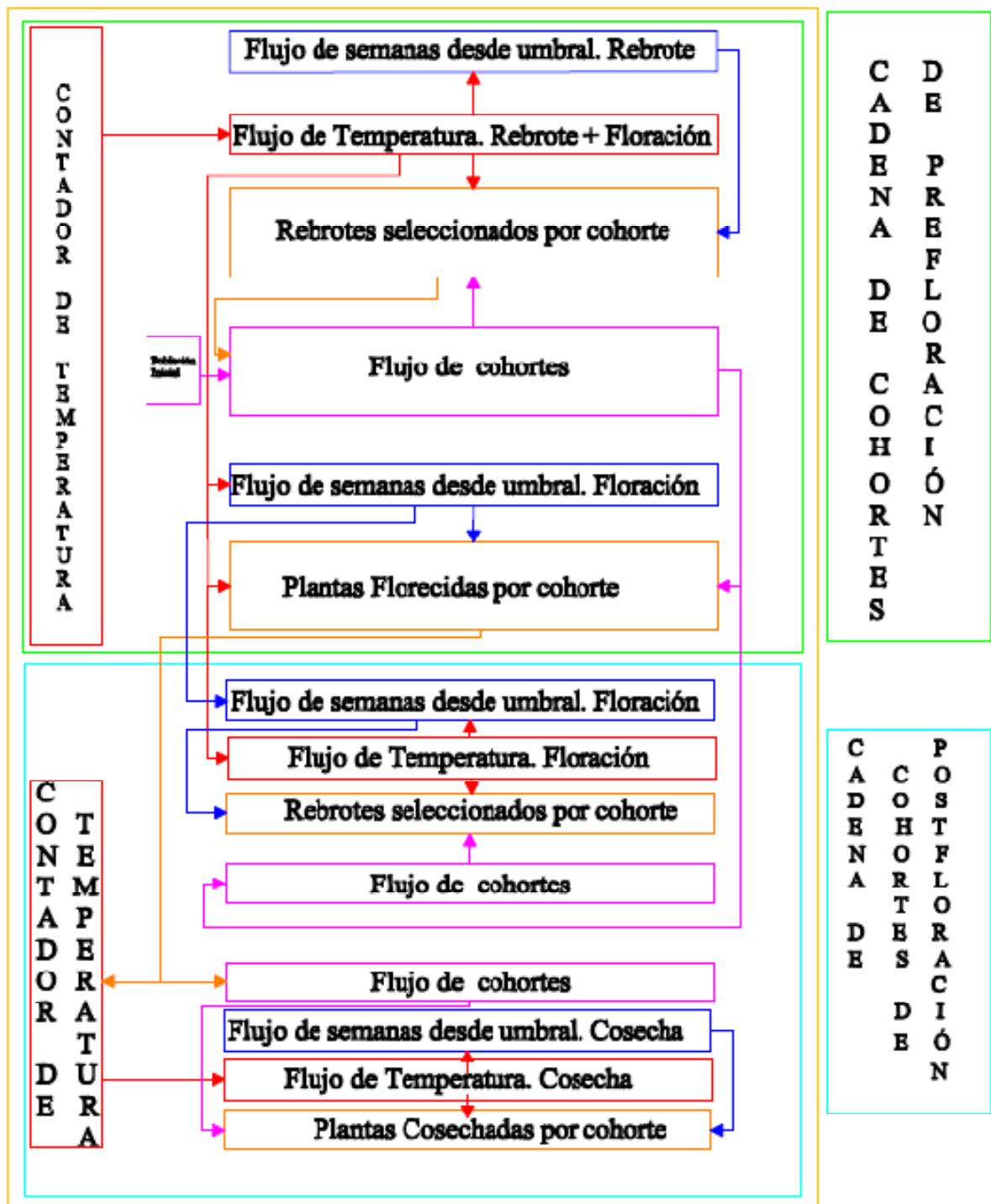


Figura 8.2: Diagrama de programación del SIMBA – POP en Evolución 4.0

Contador de Temperatura: Este contador tiene la función de iniciar la acumulación de unidades térmicas semanales diferenciadas por cohorte. Cuenta con cuatro acumuladores y un controlador que permite la transferencia al flujo de temperatura donde, posteriormente



se sincronizan con las población de la cohorte y el flujo de semana correspondientes. Se activa una vez inicia el flujo de cohortes.

Su estructura en Evolución 4.0 está dada por:

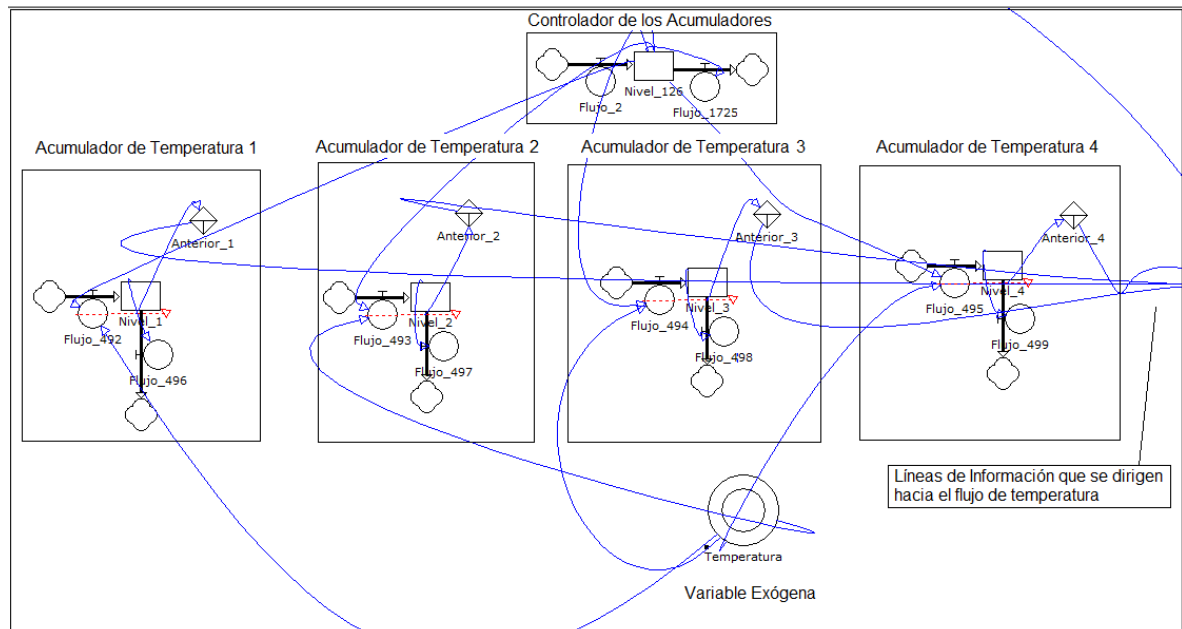


Figura 8.3: Diagrama Flujo-Nivel del contador de temperatura.

Flujos de semanas desde umbral (Rebote y Floración): Cuando una cohorte dada alcanza el umbral de unidades térmicas para rebrote y/o floración, las plantas que conforman dicha cohorte, florecen o rebrotan a una tasa determinada por las ecuaciones 1 y 2. Dicha tasa es función del número de semanas que transcurren desde que la cohorte logró el umbral de unidades térmicas (grados – día). El flujo de semanas desde umbral permite acumular para cada cohorte el número de semanas que han ocurrido desde que se alcanzó el umbral, por lo tanto funciona como acumulador y flujo. Cada cohorte corre sincronizada con un flujo de temperatura y flujos de semanas desde umbral para floración y rebrote.

Flujo de Temperatura: Las unidades térmicas acumuladas que envía el contador de temperatura fluyen a través del flujo de temperatura. Este flujo permite el paso de las unidades térmicas acumuladas de cada cohorte, acumulando a la vez las unidades térmicas de la semana correspondiente.

En la figura 8.4 se esquematizan los Flujos de Temperaturas y de Semanas desde umbral para cuatro pasos de tiempo. En total se construyeron los elementos necesarios para realizar 120 pasos de tiempo que para los umbrales y ecuaciones usados permiten simular la dinámica de la población de una plantación de banano continua en el tiempo.

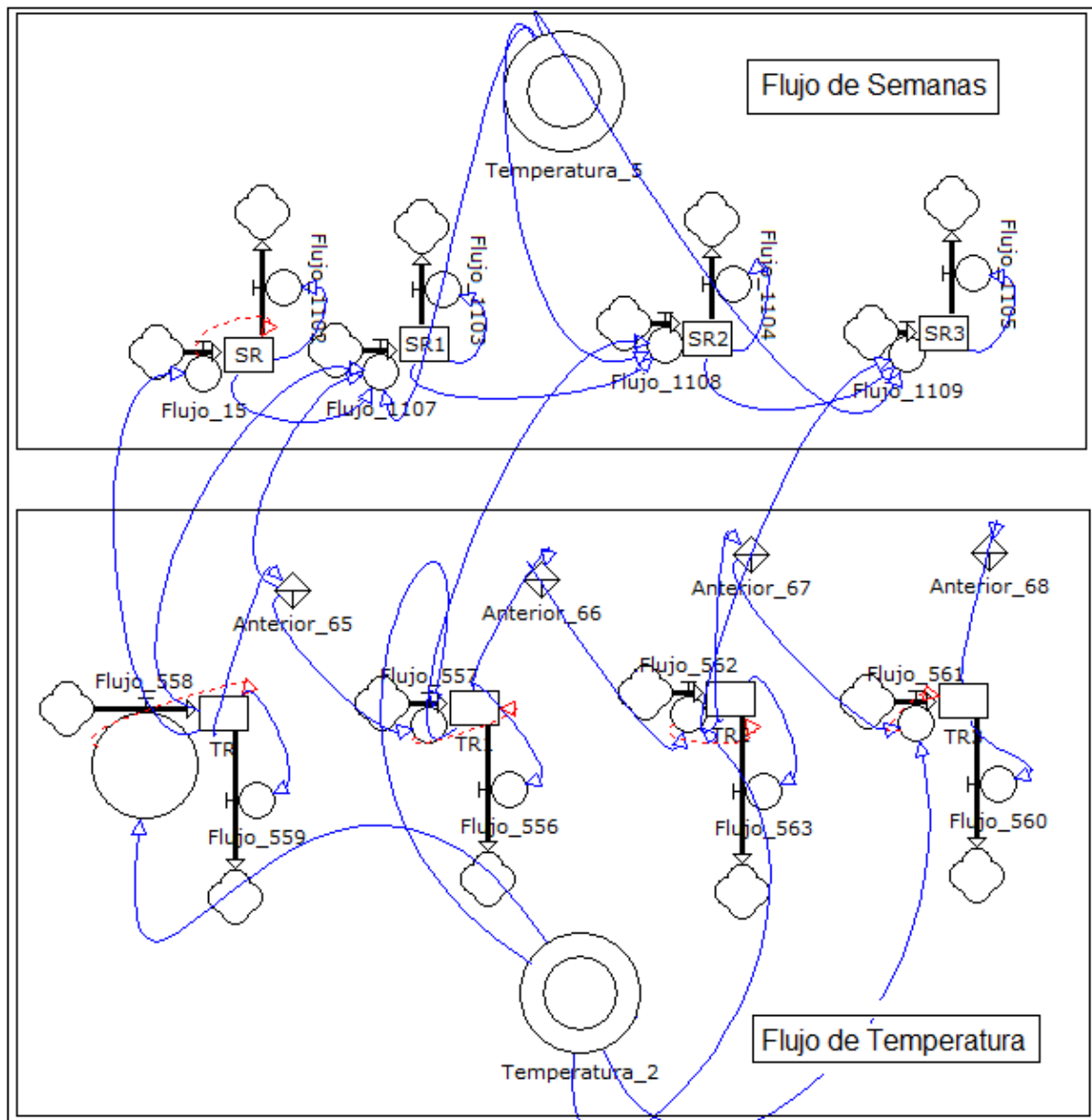


Figura 8.4: Diagrama Flujo-Nivel de los Flujos de Semanas y Temperatura.

Flujo de Cohortes: Cuando un grupo de plantas inician el proceso de simulación van fluyendo cada semana sincronizadas con las demás variables. El flujo de cohortes permite el paso organizado de las diferentes cohortes (número de plantas) sincronizado con el flujo de temperatura y flujos de semanas desde umbral para floración y rebrote. El flujo de cohortes comienza cuando se alcanza el umbral de selección de rebrotes o de floración para la población inicial. Partiendo de un número de plantas iniciales, comienza el flujo en la primera cohorte representada por un nivel “CN”, las plantas de esta cohorte pasan en el delta de tiempo (semana), a la segunda cohorte “CN1”, y así sucesivamente. Cada cohorte envía información (número de plantas) a los módulos encargados de cuantificar rebrotes o el número de plantas florecidas. Es importante advertir la modificación que se realizó al



SIMBA-POP en este módulo (Ochoa, 2010). Tixier *et al.* (2004), calculan las plantas florecidas mediante la ecuación (5), las plantas florecidas salen de la cohorte correspondiente (cadena de prefloración) y pasan a la primera cohorte de la cadena de postfloración donde acumularán las unidades térmicas hasta cosecha. Este procedimiento obliga a que la siguiente cohorte de la cadena de prefloración tenga menos plantas, que su cohorte predecesora, lo que lleva a una subestimación de las plantas florecidas. Se encontró que siguiendo el procedimiento original sólo florecía aproximadamente el 65% de las plantas que iniciaron la cohorte, y el restante 35% no se contabilizaba. Se modificó el modelo para que cada cohorte conservara la cantidad inicial de plantas durante la simulación, de esta manera, solo se permite un flujo de información desde la cohorte para calcular las plantas florecidas y la totalidad de plantas de dicha cohorte continua el flujo, logrando un florecimiento del 100% (Ochoa, 2010). En este punto se tuvo cuidado de no incrementar el número de plantas (conservación de masa), de esta manera las plantas que continúan el flujo de cohortes brindan solo información para los cálculos de rebrotes y floración y luego pasan a un sumidero.

$$FL_{i,t} = N_{i,t} * fl_{i,t} \quad (5)$$

$$N_{i,t} = N_{i-1,t-1} - FL_{i-1,t-1} - D_{i-1,t-1} \quad (6)$$

Dónde:

$FL_{i,t}$: Plantas florecidas en la cohorte i , en la semana t .

$fl_{i,t}$: es la tasa de floración.

$N_{i,t}$: Numero de plantas en la cohorte i , en la semana t . para la cadena de pre-floración.

$D_{i,t}$: Numero de plantas muertas en la cohorte i , en la semana t .

En la modificación establecida las plantas florecidas se calculan con la ecuación:

$$FL_{i,t} = N_{i-WFi,t-1,t-WFi,t-1} * fl_{i,t} \quad (7)$$

Dónde:

$N_{i-WFi,t-1,t-WFi,t-1}$: Representa el número de plantas en la correspondiente cohorte cuando el proceso de floración inicia.

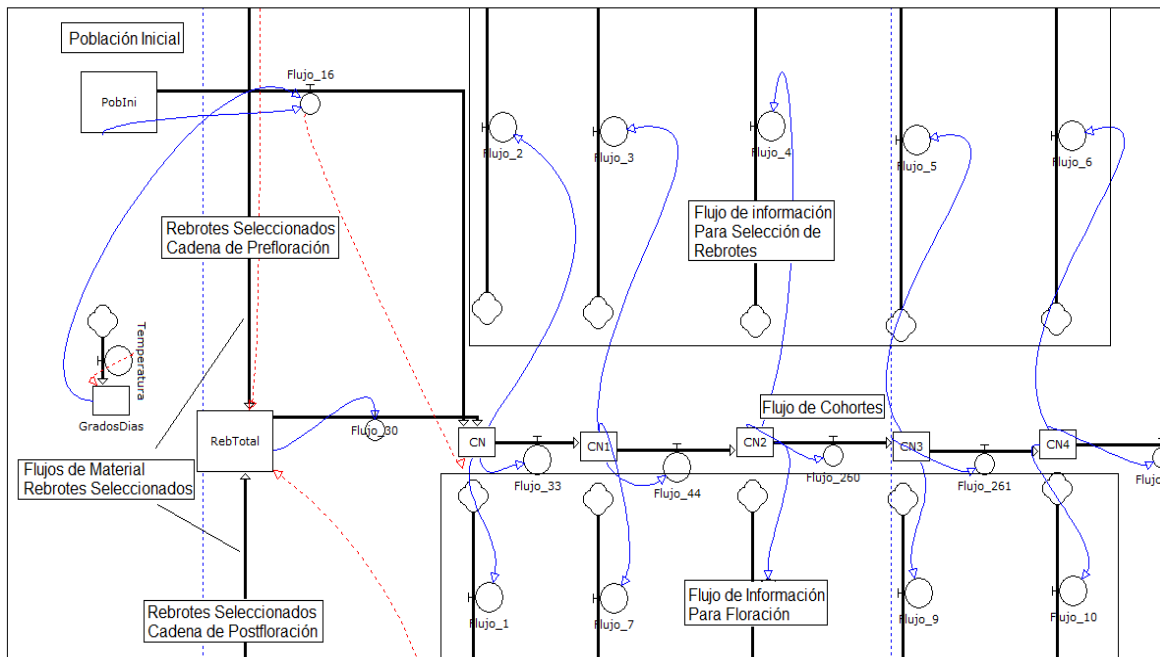


Figura 8.5: Flujo de Cohortes.

Rebotes Seleccionados por Cohorte

Este módulo recibe información de los flujos de temperatura, semanas desde umbral y plantas por cohorte. Tiene como función calcular el número de rebotes seleccionado por cohorte, acumularlos en un solo nivel (rebotes totales seleccionados) y dirigirlos nuevamente al flujo de cohortes para iniciar nuevamente el proceso.

Los rebotes seleccionados por cohorte, en las dos cadenas se calculan con las ecuaciones (1) y (8). Los rebotes totales que ingresan a la nueva cohorte de la cadena de prefloración en la semana t , se calculan con la ecuación (9).

$$S_{i,t} = s_{i,t} * N_{i,t} \quad (8)$$

$$N_{1,t} = \sum^n S_{i,t} + \sum S'_{i,t} \quad (9)$$

Dónde:

$N_{i,t}$: Número de plantas en la cohorte i , en la semana t .

$s_{i,t}$: Tasa de selección de rebotes para lo cohorte i , en la semana t .

$S_{i,t}$: Número de rebotes seleccionados en lo cohorte i , en la semana t . En la cadena de prefloración.

$S'_{i,t}$: Número de rebotes seleccionados en lo cohorte i , en la semana t . En la cadena de postfloración.

Plantas Florecidas por Cohorte

Este módulo recibe información de los flujos de temperatura, semanas desde umbral y plantas por cohorte. Tiene como función calcular el número de plantas florecidas por cohorte, acumularlas en un solo nivel (plantas florecidas totales) y dirigirlos a la cadena de cohortes de postfloración.



Plantas Cosechadas por Cohorte

Este módulo recibe información de los flujos de temperatura, semanas desde umbral y plantas por cohorte. Tiene como función calcular el número de racimos cosechados por cohorte, y acumularlas en un solo nivel (plantas cosechadas totales). Las plantas cosechadas se calculan según las ecuaciones:

$$H_{i,t} = N_{i,t} * h_{i,t} \quad (10)$$

$$H_t = \sum_1^n H_{i,t} \quad (11)$$

Dónde:

$N_{i,t}$: Número de plantas en la cohorte i , en la semana t .

$H_{i,t}$: Racimos cosechados en la cohorte i , en la semana t .

H_t : Total de racimos cosechados en la semana t .

$h_{i,t}$: Tasa de cosecha de racimos. Una vez se alcanza el umbral HT , la tasa es determinada mediante un histograma de 3 semanas ($WH_{i,t}$):

Si $SUMT_{i,t} \geq HT$ entonces $WH_{i,t} = WH_{i-1,t-1} + 1$

Si ($WH_{i,t} = 1$, entonces $h_{i,t} = 0.2$)	} $h_{i,t}$
Si ($WH_{i,t} = 2$, entonces $h_{i,t} = 0.625$)	
Si ($WH_{i,t} = 3$, entonces $h_{i,t} = 0.175$)	

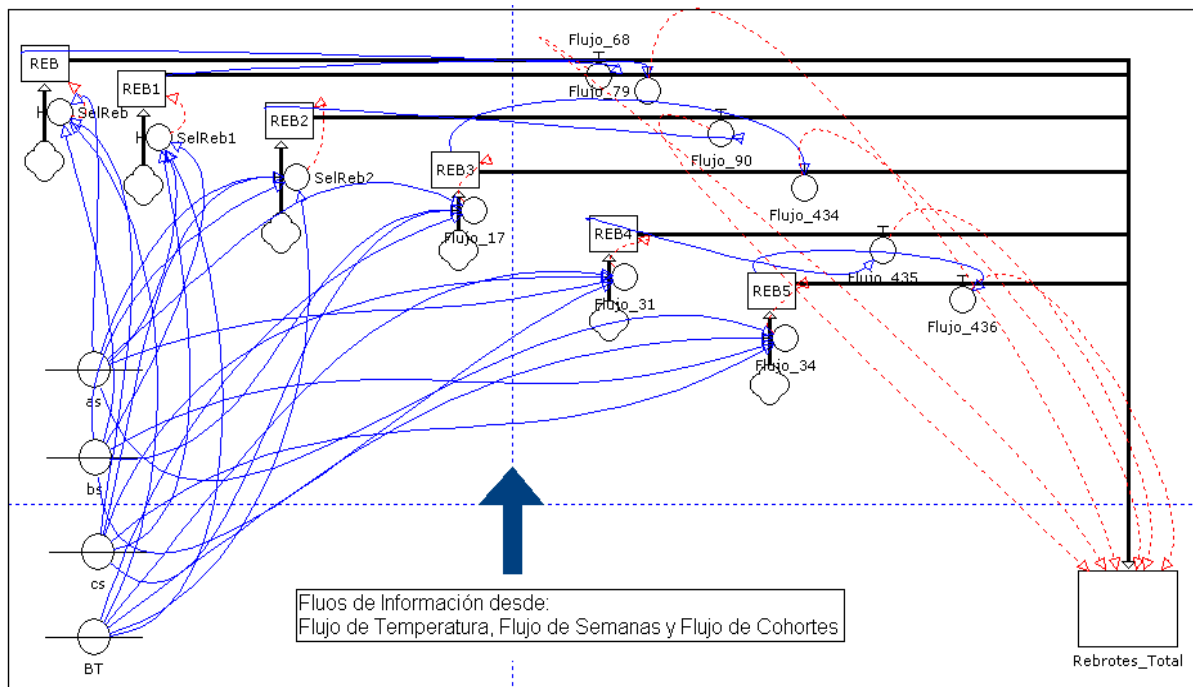


Figura 8.6: Rebotes Seleccionados por Cohorte



8.1.1 Consideraciones para el modelamiento

Una plantación de banano establecida está compuesta de plantas en diferente estado de desarrollo. En un cultivo comercial, el comportamiento de la población de banano, además de responder a las condiciones climáticas, edáficas y de interacción con plagas y enfermedades, está fuertemente condicionado por el manejo del cultivo.

Las prácticas agrícolas están destinadas a mantener un buen retorno, garantizar la densidad plantación, mantener el espaciamiento entre plantas y por lo tanto buenas condiciones de luminosidad para toda la plantación.

En las plantaciones comerciales normalmente 2 plantas son visibles por “unidad de producción” la planta madre y una hija, aunque se trata de mantener tres plantas por “unidad de producción” Madre, Hija y Nieta. Cada pseudotallo representa una generación diferente.

Como el número de rebrotes que salen de cada planta es elevado, una plantación se puede manejar de diversas maneras. En algunas regiones en el desihe y/o desmache se seleccionan dos plantas por unidad de producción con el fin de establecer un cultivo en surco doble y aumentar densidad de plantación y número de racimos por hectárea. En el Urabá Antioqueño (C.I Banacol S.A), el desmache se realiza a temprana edad y con el fin de mantener cada unidad de producción con tres plantas: Madre, Hija y Nieta.

Con el manejo planteado una plantación de banano de la empresa C.I Banacol S.A tiene un retorno entre 1,4 y 1,6 racimos por planta-año. Aproximadamente, transcurre un tiempo entre 32 y 34 semanas, en el cual, de cada unidad de producción se cosecha un racimo. Lo anterior implica que desde que una planta de banano es seleccionada en campo (planta C. figura 8.7) transcurren alrededor de 64 semanas hasta que es cosechada. En la figura 8.7 una unidad de producción la mayor parte del tiempo está compuesta por tres plantas: Madre, Hija y Nieta. En el costado izquierdo las plantas están identificadas por: La Madre (A) y la Hija (B). En ese instante la Madre (A) es una planta que recién ha florecido (parido), a partir de ese momento transcurren unas 12 semanas hasta que se cosecha su racimo, se corta su parte superior y solo se deja parte del pseudotallo, en algún momento en este intervalo de tiempo se selecciona la planta (C), desde que la planta (A) es cosechada, transcurren aproximadamente 20 semanas más para que la planta (B) florezca y se seleccione un nuevo rebrote D. Siguiendo la secuencia transcurren un poco mas de 64 semanas para que la planta (C), el rebrote seleccionado inicialmente, finalmente sea cosechado.

Un manejo del cultivo con estos criterios implica que en promedio se tiene una población de rebrotes seleccionados de aproximadamente 1,4 a 1,6 por año.

El exceso de rebrotes por año es una condición anómala detectada en la calibración del SIMBA – POP original. (Ochoa, 2010)



Aunque las medidas en administración son tomadas para mantener el cultivo en unas condiciones óptimas, los datos recolectados corresponden a las condiciones normales a las que es sometida a una plantación de banano en la región: enfermedades, plagas, déficit y/o excesos hídricos, vendavales, etc. A pesar de que en una plantación de banano se registra gran cantidad de información, es imposible conocer en detalle cual es la historia de una finca en su totalidad y las medidas que se han tomado en fertilización, control de plagas, repoblación, etc. Por lo cual la calibración del modelo se realizó con datos bajo estas condiciones.

Se debe recordar, que el modelo SIMBA – POP, permite simular, solo la dinámica poblacional de una plantación de banano, es decir, el número de plantas que se encuentran en diferente estado en cada momento (rebrote, florecimiento y cosecha), y la interacción de la plantación con los estímulos climáticos (Temperatura) y administrativos. La calidad y cantidad de producción se asocia a cada cohorte y debe modelarse con alguno de los acercamientos mecanísticos que se describen en la revisión bibliográfica.

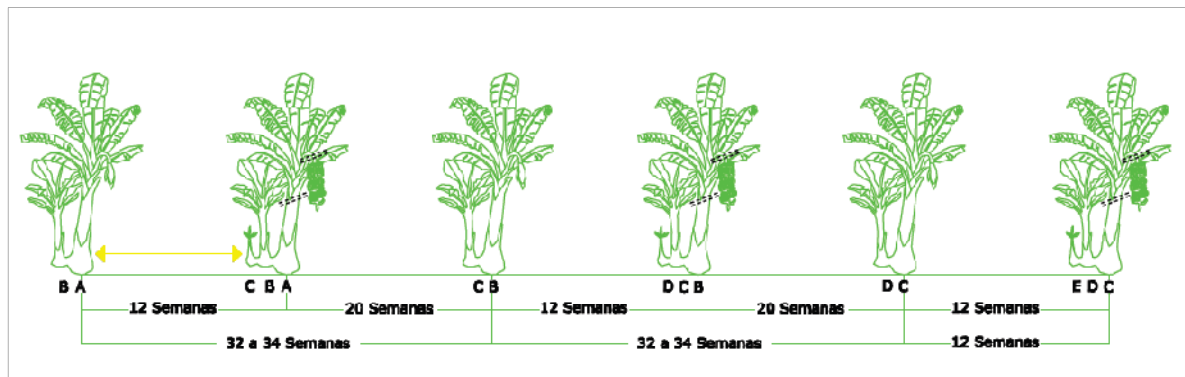


Figura 8.7: Esquema de la evolución de una planta de banano en Urabá.

8.1.2 Selección de la finca para la calibración del modelo

Para el proceso de calibración y validación del modelo, se recolectó información de 10 fincas de la compañía C.I Banacol S.A distribuidas en todo el eje bananero del Urabá Antioqueño (figura 8.8).

El modelo SIMBA – POP original, fue calibrado y validado para *Musa spp.*, grupo AAA, cv. Cavendish Gran Enano. De las 10 fincas a las que se tuvo acceso a la información solo dos están sembradas con una única variedad de Banano (Valery y/o Williams) el resto tienen lotes de diferente cultivar (Valery, Gran Enano y/o Williams). Teniendo en cuenta esta situación, y con miras a lograr el mayor aprovechamiento del modelo calibrado en la situación actual de las plantaciones de C.I Banacol SA y en general del Urabá Antioqueño, se procedió a analizar el comportamiento de las series y ciclos de embolses y cajas exportadas de las diferentes fincas a fin de encontrar similitudes y/o diferencias, teniendo en cuenta los diferentes cultivares.

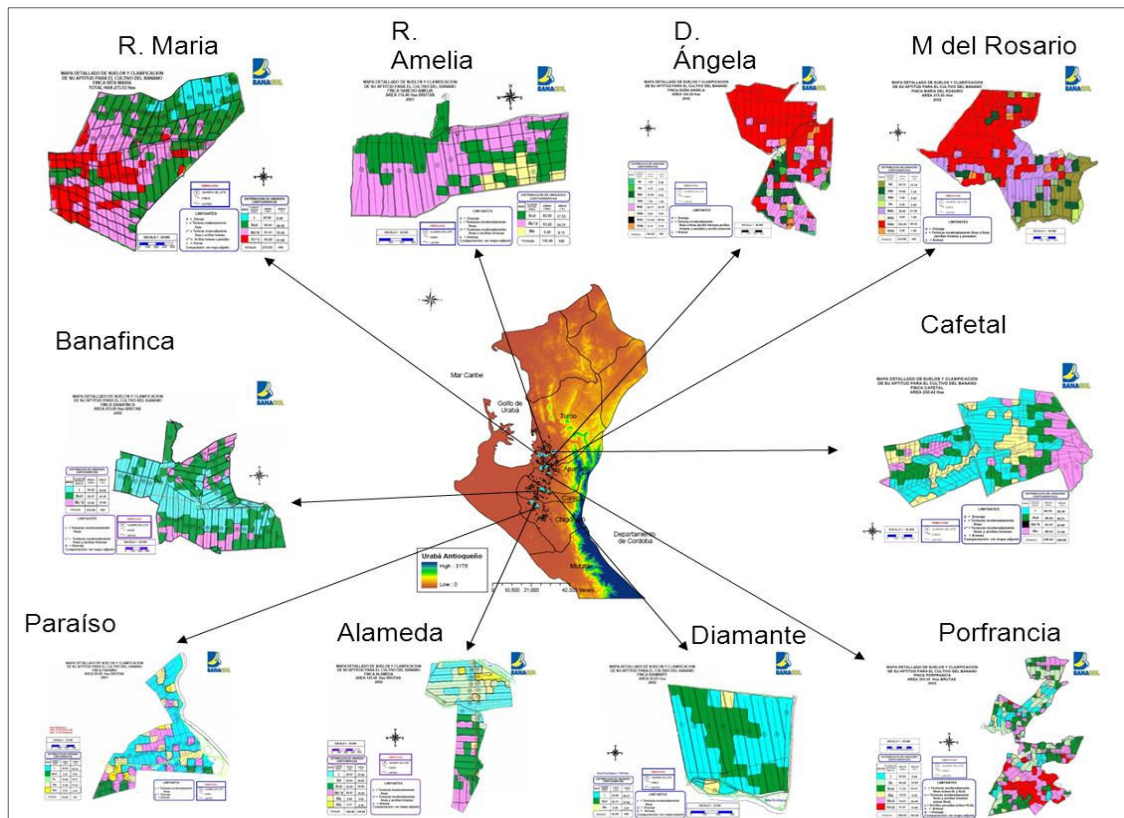


Figura 8.8: Ubicación Espacial de las Fincas Bananeras Seleccionadas

8 de las 10 fincas presentan en su área sembrada, lotes de diferente cultivar de Banano *Musa* spp., grupo AAA, cv. Valery, Williams y Gran Enano. Se realizó un análisis de las series de tiempo con el fin de encontrar diferencias o similitudes entre las series de tiempo de embolse de las diferentes fincas. En la figura 8.9 la finca Alameda posee 28 lotes, sembrados en su totalidad en cv. Valery. La finca Rancho Amelia posee 16 lotes, 15 de ellos sembrados con cv. Valery, sólo el lote 5 está sembrado con cv. Gran Enano. Se advierte un comportamiento similar de las series en el periodo hasta aproximadamente la semana 200, en adelante se observan diferencias en las dos series. En cuanto a la magnitud los picos de la finca Alameda normalmente son mayores a los registrados en Rancho Amelia.

Las figuras 8.10, 8.11 y 8.12 muestran el comportamiento de las series de tiempo de embolse para las fincas Alameda (cv. Valery), Diamante (cv. Williams), Doña Angela (cvs, Williams, Valery y Gran Enano), y Banafinca (cvs. Gran Enano y Valery) obsérvese el comportamiento similar tanto en periodo como en magnitud entre las diversas series de embolse. Soportados en este comportamiento se decidió que independiente del tipo de cultivar que tuviera la finca (cvs, Williams, Valery y Gran Enano) o sus combinaciones, se podría realizar la calibración del modelo con una de ellas siempre y cuando cumpliera con los demás criterios que se detallan a continuación.

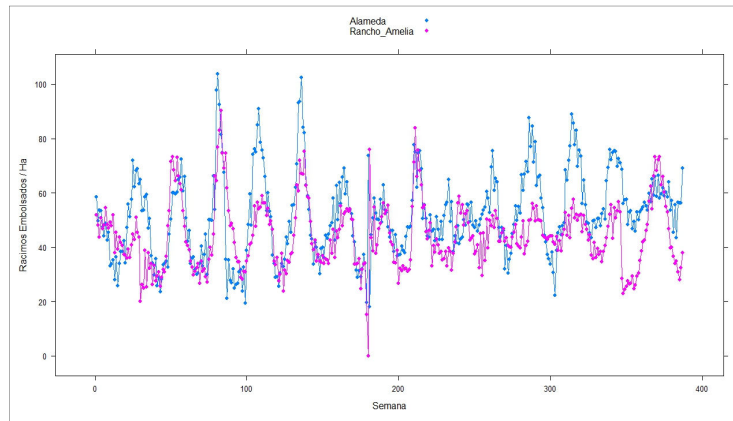


Figura 8.9: Embolse en dos fincas cultivadas con *Musa* spp., grupo AAA, cv. Valery.

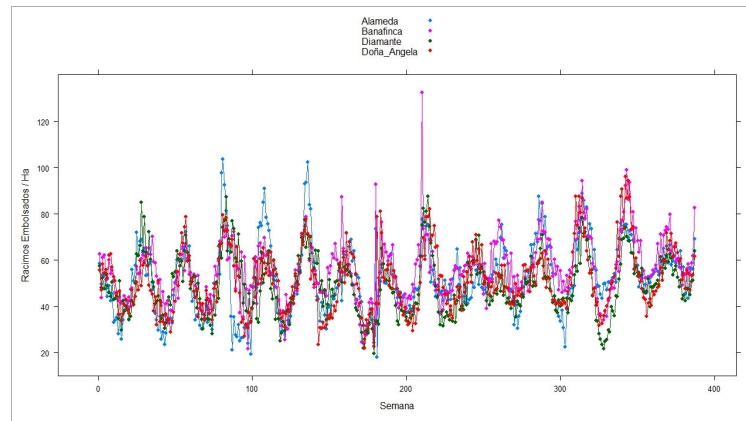


Figura 8.10: Embolse en fincas con variedades. *Musa* spp., grupo AAA, cvs. Valery, Gran Enano y Williams.

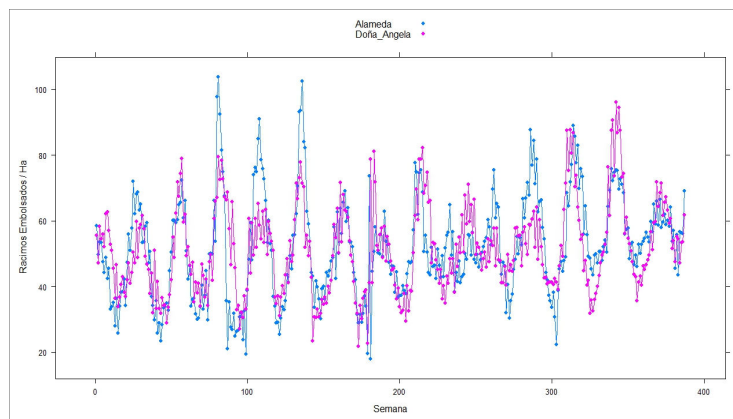


Figura 8.11: Comportamiento del embolse en dos fincas con diferente cultivar.

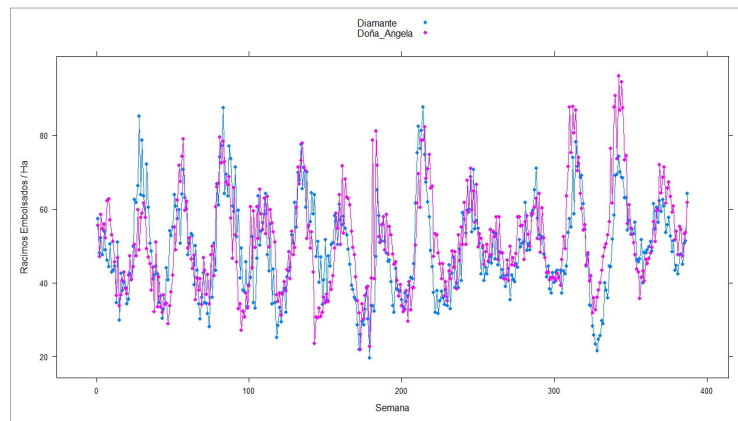


Figura 8.12: Comportamiento del embolse en dos fincas con diferente cultivar.

La selección de una finca apropiada para la calibración del modelo se fundamentó en las siguientes condiciones:

- La calibración se basa en la serie de embolse (Control de florecimiento) antes que racimos cosechados, ya que dicha serie es poco influenciada por las condiciones de mercado de la fruta.
- El efecto de los eventos climáticos extremos (Fases del ENSO), sobre la serie de embolse, durante el periodo registro debe ser el menor posible. Para identificar este efecto se construyeron gráficos Box-Plot, Masa Simple, Serie de Tiempo, y se analizó la relación Año Niño – Niña / promedio anual de embolse.
- Históricamente debe poseer baja afectación de enfermedades, para el caso (Sigatoka Negra), principal enfermedad limitante. Para analizar la incidencia de esta enfermedad se analizaron los registros de los índices YLS y YLWS para las diez fincas.
- La serie de embolse de la finca debe presentar un comportamiento similar al de las demás fincas. Esto disminuye el riesgo de escoger una finca que durante el periodo de registro hubiera presentado pérdidas de plantación por algún evento no considerado. Para analizar este comportamiento se calculó coeficiente de correlación lineal de las series de embolse estandarizadas para todas las fincas.

Con base en estas premisas se realizó un análisis de las series de embolse y cajas exportadas de las 10 fincas. Se construyeron graficas de series de tiempo, box-plot, masa simple, ciclo anual, igualmente se realizó análisis de eventos extremos (Fases del ENSO) en las distribución y magnitud anual del embolse por finca y se calculó el coeficiente de correlación lineal entre las diferentes series de tiempo de embolse estandarizadas.

Las figuras 8.13, 8.14 y 8.15 muestran el comportamiento de las series de tiempo y el ciclo anual de embolse / ha y cajas exportadas / ha, para cada una de las fincas. Advértase la menor variabilidad en el ciclo y serie de embolse respecto al ciclo y serie de cajas exportadas, estas últimas, afectadas, además de las condiciones de mercado, por el tamaño del racimo (ratio), que puede verse más afectado por las condiciones climáticas.

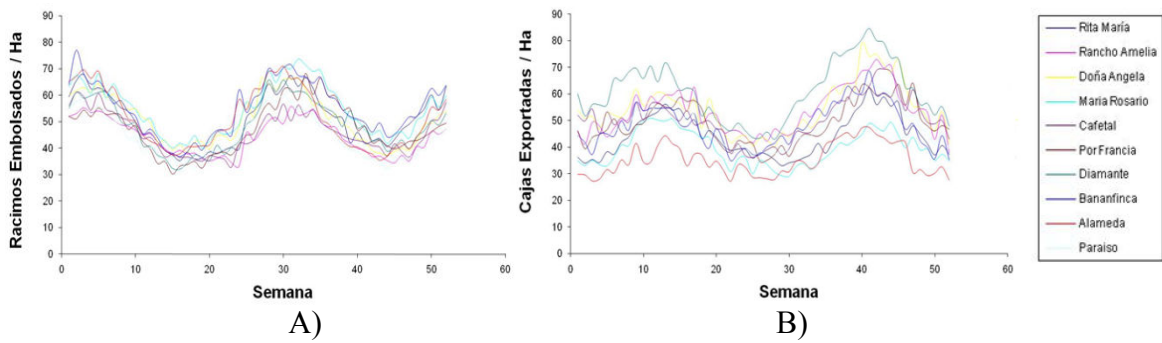


Figura 8.13: A) Ciclo de racimos embolsados y B) Ciclo de cajas exportadas de las diez fincas analizadas.

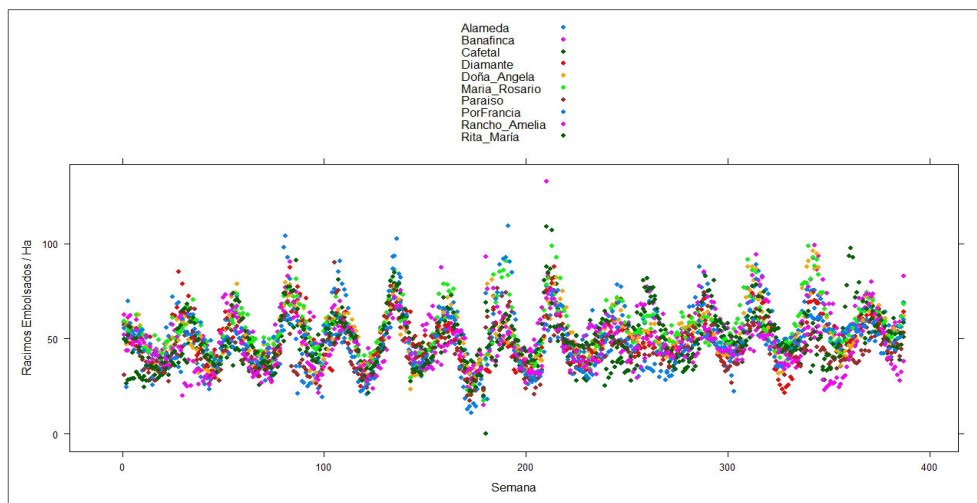


Figura 8.14: Series de racimos embolsados/Ha para las diez fincas analizadas.

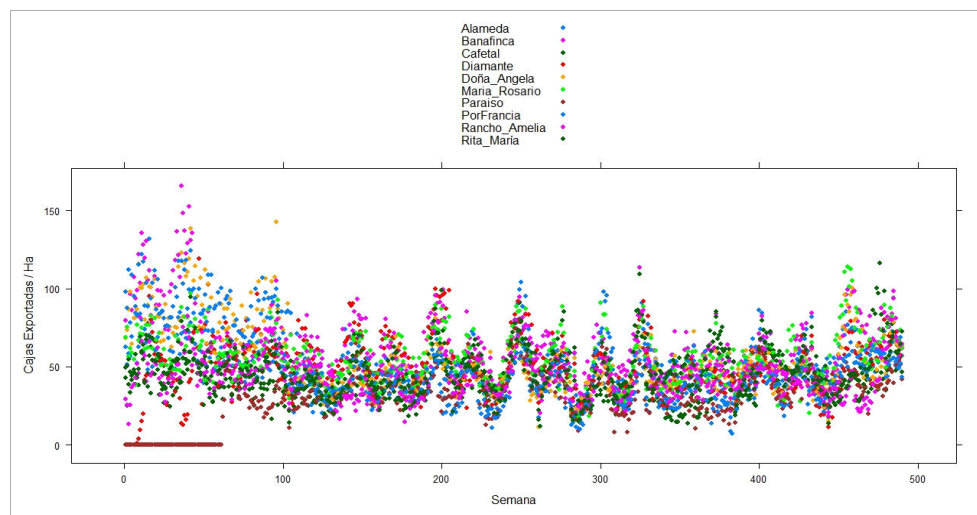


Figura 8.15: Series de cajas exportadas /Ha para las diez fincas analizadas.



Se procedió a estandarizar las series de embalse para cada una de las fincas y se calculó el coeficiente de correlación entre las series estandarizadas a fin de encontrar similitudes entre las series (Tabla 8-1). Se encontró que las fincas que presentan mejor correlación con las series de todas las fincas son Doña Ángela y María Rosario.

Tabla 8-1: Coeficiente de Correlación lineal entre las series de embalse estandarizadas.

	Rita María	Rancho Amelia	Doña Ángela	María Rosario	Cafetal	Por Francia	Diamante	Bananfinca	Alameda	Paraíso	Acumulado
Rita María	1,0	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3	4,0
Rancho Amelia	0,3	1,0	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3	3,9
Doña Ángela	0,3	0,4	1,0	0,7	0,2	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	5,3
María Rosario	0,4	0,3	0,7	1,0	0,3	0,7	0,5	0,5	0,4	0,5	5,3
Cafetal	0,4	0,3	0,2	0,3	1,0	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	3,4
Por Francia	0,3	0,3	0,6	0,7	0,2	1,0	0,5	0,4	0,4	0,6	4,8
Diamante	0,2	0,4	0,6	0,5	0,2	0,5	1,0	0,5	0,4	0,3	4,6
Bananfinca	0,3	0,2	0,5	0,5	0,3	0,4	0,5	1,0	0,5	0,4	4,6
Alameda	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	1,0	0,5	4,8

Se analizó el comportamiento de la Sigatoka Negra en las fincas mediante la acumulación de los valores semanales de los índices YLWS y YLS. Según el índice YLWS las fincas María Rosario y Doña Ángela presentan el mejor comportamiento ante el ataque de la Sigatoka Negra, con valores prácticamente iguales. En cuanto al YLS María Rosario es la finca que mejor comportamiento presenta, mientras que Doña Ángela y Rancho Amelia ocupan el tercer lugar, muy cercanos al segundo lugar ocupado por la finca Rita María.

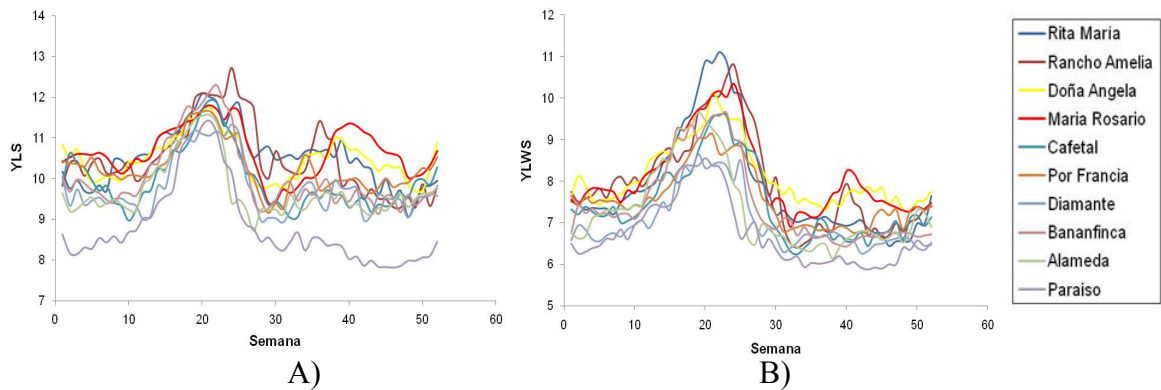


Figura 8.16: Ciclo anual del A) YLS y B) YLWS para las 10 fincas analizadas.



Tabla 8-2: Índices para medir incidencia de la Sigatoka Negra.

FINCA	YLWS	YLS
María Rosario	1874,69	2456,91
Doña Ángela	1873,17	2419,42
Rancho Amelia	1841,49	2419,86
Rita María	1825,28	2426,9
Por Francia	1751,48	2367,19
Banafinca	1729,68	2321,32
Cafetal	1721,01	2296,74
Alameda	1693,32	2233,03
Diamante	1615,45	2242,67
Paraíso	1553,17	2028,67

La series de embolse, comprenden el periodo enero 2001 – Junio 2008. En este periodo se presentaron tres eventos El NIÑO (2002 – 2003, 2004 – 2005, 2006 - 2007) y un evento La NIÑA (2007 – 2008). Se calculó el promedio multianual del número total de racimos embolsados para el periodo y se calculó la relación entre los racimos embolsados para cada fase del ENSO (acumulado entre Mayo (año i) – Junio (año i-1)). Al presentarse tres eventos EL NIÑO en el periodo registrado, puede existir algún sesgo de la serie por esta causa, sin embargo en general se nota una leve reducción en el número de racimos embolsados durante la fase cálida del ENSO. Una de las fincas que presentó menor afectación durante la ocurrencia de EL NIÑO es Doña Ángela. Sin embargo durante la fase fría del ENSO el embolse en esta finca tiene una de los mayores incrementos.

Tabla 8-3: Relación entre el embolse en año NIÑO – NIÑA / promedio multianual.

FINCA	Rita María	Rancho Amelia	Doña Ángela	María Rosario	Cafetal	Por Francia	Diamante	Banafinca	Alameda
Niño 2002 - 2003	0,99	1,06	1,00	0,98	1,06	0,96	1,02	0,96	0,98
Niño 2004 - 2005	0,98	1,00	1,00	1,01	1,05	1,08	0,95	0,99	0,96
Niño 2006 - 2007	1,13	1,02	1,04	1,03	1,12	1,04	0,98	1,09	1,13
Niña 2007 - 2008	1,10	1,07	1,17	1,16	1,04	1,11	1,10	1,16	1,15

Del análisis anterior se seleccionan las fincas Doña Ángela y María Rosario como candidatas para la calibración del modelo. A continuación se presentan las figuras de serie de tiempo, curva de masa simple y box-plot, para las series de embolse de las fincas Doña Ángela y María Rosario, con el fin de seleccionar la más apropiada para la calibración del SIMBA – POP.

En las figuras 8.17 a 8.22 se aprecia una mayor variabilidad en el embolse de la finca María Rosario, respecto al embolse de la finca Doña Ángela. Esta mayor dispersión de los datos se puede apreciar con mayor claridad en el diagrama box-plot.



Las curvas de masa muestran que el volumen de racimos embolsados por año. Año tras año es más estable para la finca María Rosario que para la finca Doña Ángela sin embargo de la figuras de box-plot y la serie se observa que la distribución de ese embolse presenta mayor variabilidad al interior del año para la finca María Rosario que para la finca Doña Ángela.

Finalmente, luego del análisis descrito se escogió la serie de racimos embolsados de la finca Doña Ángela, como la más apropiada para la calibración del SIMBA – POP.

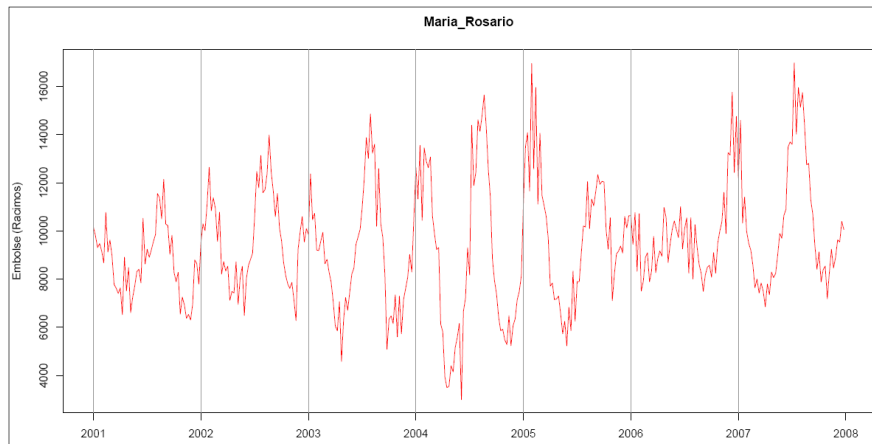


Figura 8.17: Embolse de la finca María Rosario.

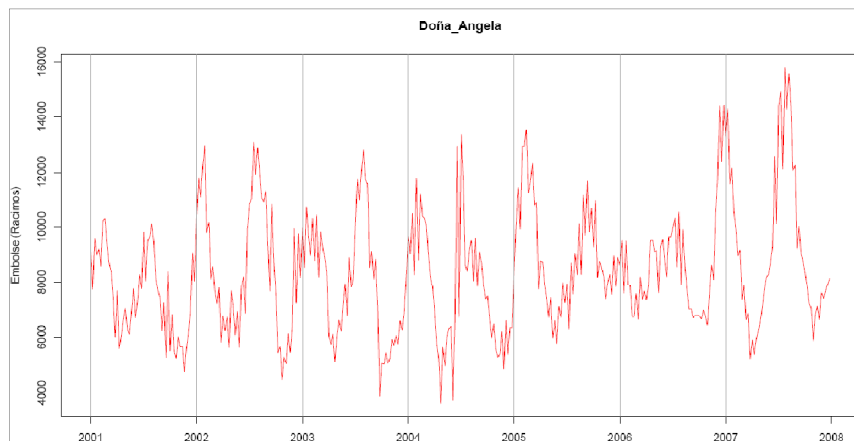


Figura 8.18: Embolse de las finca Doña Ángela.

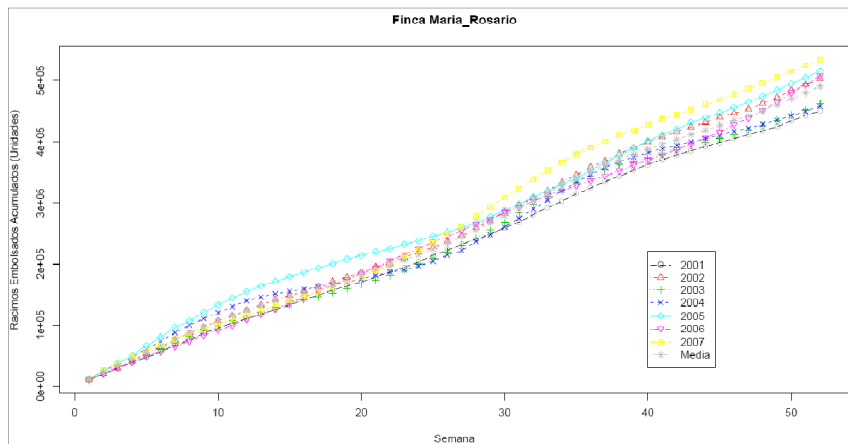


Figura 8.19: Curva de masa simple del embolse semanal de la finca María Rosario.

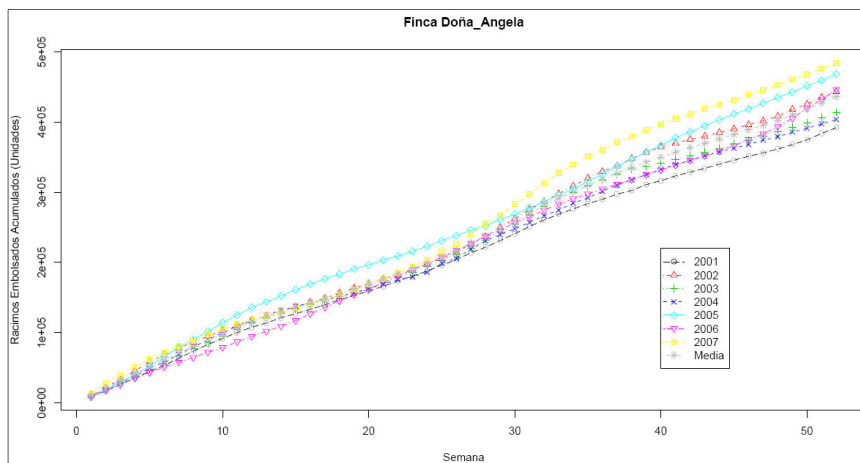


Figura 8.20: Curva de masa simple del embolse semanal de la finca Doña Ángela.

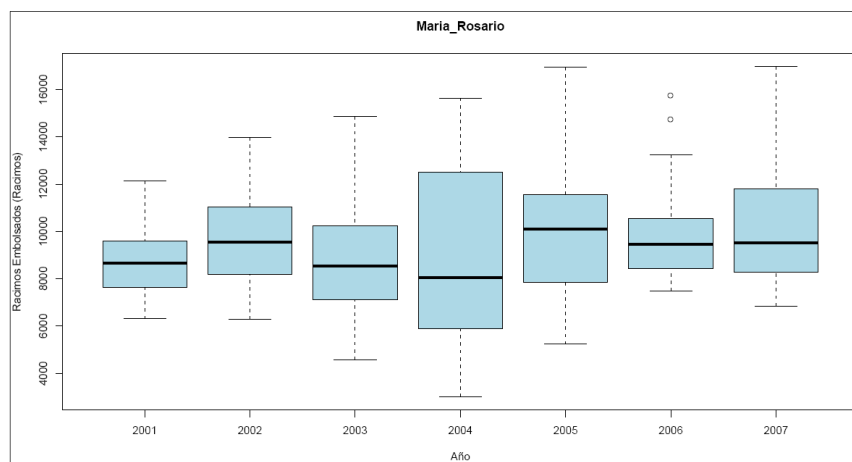


Figura 8.21: Box-plots del embolse semanal de la finca María Rosario.

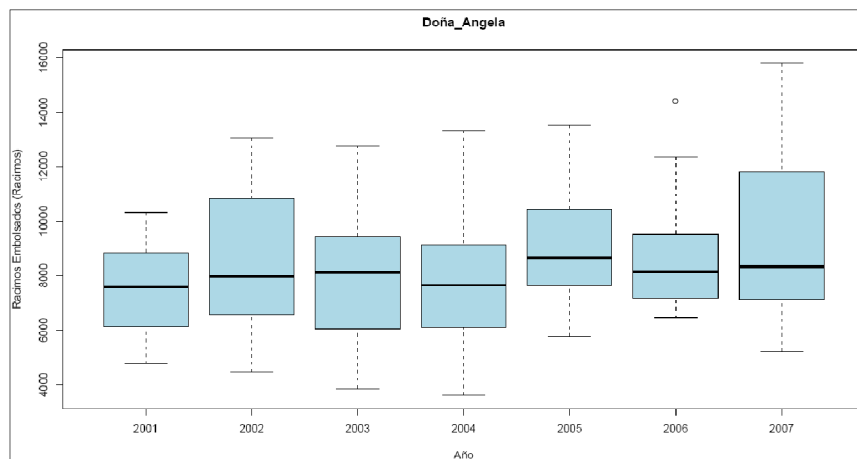


Figura 8.22: Box-plots de la serie de embolse semanal de la finca Doña Ángela.

Generalidades de la Finca Doña Ángela.

Ubicación:

Latitud: 7° 54' 04,87" N.

Longitud: 76 41' 43,87" W.

Altura: 15 m.s.n.m.

Área Bruta: 194,96 Ha.

Área Neta: 164,47 Ha.

Serie de Embolse: Inicio: semana 01/2001 Finaliza: Semana 23/2008

Serie de Cajas Exportadas: Inicio: semana 01/1999 Finaliza: Semana 22/2008

Serie de ratio: Inicio: semana 01/1999 Finaliza: Semana 22/2008

Textura: La mayor parte de la plantación está sembrada sobre texturas finas a moderadamente finas, con unas pequeñas áreas de texturas medias a gruesas.

Precipitación promedio: 2435 mm.

8.2 Calibración y validación del modelo SIMBA - POP

8.2.1 Calibración del modelo SIMBA – POP modificado.

La calibración del modelo se desarrolló bajo las siguientes condiciones:

- Se inicia la calibración modificando la ecuación de selección de rebrotes (ecuación 1) la cual fue identificada como responsable de la sobrestimación del número de rebrotes por año, compensando el déficit de plantas florecidas en el modelo original. (Ochoa, 2010).
- La selección de rebrotes responde por mucho, a las prácticas de manejo del cultivo, por lo cual difiere de un lugar a otro según las estrategias de manejo del cultivo, por lo cual es adecuado iniciar la calibración modificando los parámetros a_f , b_f y c_f de esta ecuación, adicionalmente tal como lo realizó (Tixier *et al.*, 2004), la modificación del BT (umbral de unidades térmicas para el inicio de la selección de rebrotes) además de



- representar condiciones fisiológicas, también está fuertemente relacionado con criterios de manejo de la plantación por lo cual puede ser sujeto a modificaciones.
- La combinación de los parámetros af, bf, cf, en la ecuación de rebrotes, debe garantizar que el área bajo la curva sea uno (1), es decir, para cada planta dentro de una cohorte, se garantiza la selección de un sólo rebrote.
 - En el momento de la floración de una planta de banano, la unidad de producción estará compuesta de tres plantas la madre, la hija y la nieta. Teniendo en cuenta el tiempo transcurrido entre floraciones, la población de rebrotes está limitado a un rango comprendido entre 1,4 a 1,6 veces por año la población establecida.
 - La tasa de racimos embolsados representa la tasa de florecimiento del modelo.
 - 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.
 - Se calculó el ciclo anual de las temperaturas medias, y con esta serie se corrió el modelo por 6 años, Con la información resultante se determinó el ciclo anual medio de florecimiento y cosecha.
 - El proceso de calibración se realiza tanto para el periodo de la serie (picos y valles), como en el número de racimos embolsados (magnitud).
 - La simulación empieza desde el establecimiento de la plantación, por lo tanto, la calibración incluye un tiempo hasta lograr estabilizar el modelo a una plantación establecida (crear el asincronismo).
 - Se estima el error cuadrático, raíz del error cuadrático, desviación media, error medio y curvas de doble masa, coeficientes de correlación lineal entre las series de embolse simulada y registrada como métodos estadísticos para el control de la calibración.
 - La densidad de plantas para todas las fincas incluyendo Doña Ángela se consideró como 1750 plantas/Ha. Con esta densidad y el área neta de plantación de cada finca se calculó el número de plantas iniciales para correr el modelo e iniciar el proceso de calibración.

Tal como lo realizó [Tixier et al. \(2004\)](#), en la calibración del SIMBA – POP modificado se usaron métodos estadísticos complementarios para evaluar la exactitud del modelo en la predicción. Por las razones ya comentadas, la calibración y validación se realizó respecto a los picos de embolse (florecimiento) antes que los de cosecha.

La desviación media (DM) entre los datos observados (históricos) y los simulados es una medida de la tendencia del modelo a sobre o subestimar un valor observado. Se calcula según la ecuación:

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

Donde:

Y_i : i-ésimo valor simulado.



X_i : i-ésimo valor observado.
 n : Tamaño de la muestra analizada.

El error medio de predicción (EMP) es un indicador de la exactitud del modelo. Se calcula según la ecuación:

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

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 and Goffinet, 1989; Gauch *et al.*, 2003), puede incluso dividirse en tres componentes (Gauch *et al.*, 2003).

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

La raíz del error cuadrático medio (RECMC) se usa para expresar en las mismas unidades de los valores observados.

$$RECMC = \sqrt[2]{ECMP} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Y_i - X_i)^2}{n}}$$

Con base en los estadísticos calculados y en las figuras elaboradas se procedió a escoger la combinación de parámetros de la ecuación de rebrotes que mejor ajustara a los datos registrados. En la figura 8.23 se muestran las curvas de masa para cuatro combinaciones de parámetros. Se observa que la combinación 16, sobrestima el embolse (floración) simulado, mientras que la combinación 4 subestima la floración. Las combinaciones 35 y 29 tienen un mejor comportamiento respecto a los registros acumulados.

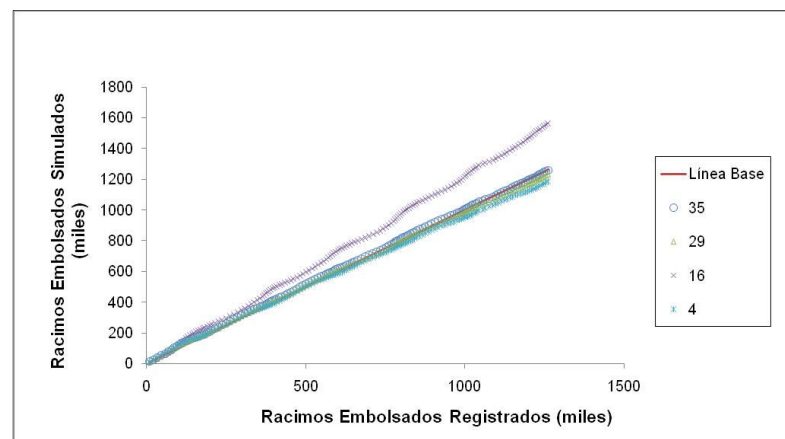


Figura 8.23: Curvas de racimos embolsados acumulados.

La tabla 8-4 muestra los valores de los estadísticos calculados respecto al embolse registrado en la finca Doña Ángela.



Tabla 8-4: Calibración del SIMBA – POP modificado

	Parámetros de la ecuación de selección			Umbral °C	DM	EMP	ECMP	RECMC	R *
	AS	BS	CS	BT					
1	0,2	2,8	0,58	2380	146,0	1083,6	2090911,1	1446,0	0,79
2	0,192	2,8	0,6	2380	515,1	1227,9	2491989,6	1578,6	0,76
3	0,157	2,8	0,7	2380	1559,0	2143,6	6394307,9	2528,7	0,53
4	0,22	2,7	0,55	2380	-470,5	1357,3	2772810,6	1665,2	0,79
5	0,2	2,7	0,6	2380	786,5	1279,9	2568860,4	1602,8	0,8
6	0,16	2,7	0,55	2380	-7285,7	7285,7	57215565,3	7564,1	0,53
7	0,19	2,7	0,55	2380	-5483,0	5483,0	33054054,5	5749,3	0,66
8	0,21	2,7	0,55	2380	-2707,1	2742,6	9631465,4	3103,5	0,76
9	0,215	2,7	0,55	2380	-1678,1	1868,2	5132763,6	2265,6	0,78
10	0,215	2,7	0,57	2380	1040,7	1474,4	3459963,3	1860,1	0,81
11	0,21	2,7	0,6	2380	4760,4	4777,6	25823843,5	5081,7	0,77
12	0,21	2,7	0,58	2380	1009,6	1412,5	3150800,8	1775,0	0,81
13	0,21	2,8	0,575	2380	2819,2	2922,6	10467556,9	3235,4	0,8
14	0,22	2,8	0,55	2380	1893,3	2123,4	6456214,2	2540,9	0,82
15	0,21	6	0,3	2080	2225,9	2836,7	12398617,9	3521,2	0,81
16	0,152	6	0,4	2080	1941,7	2506,2	8989544,1	2998,3	0,4
17	0,172	6	0,35	2080	117,5	1539,8	3964514,6	1991,1	0,66
18	0,172	6	0,36	2080	2302,1	2710,9	10350723,1	3217,3	0,61
19	0,12	8	0,38	1880	1190,6	2694,5	9845284,9	3137,7	-0,27
20	0,13	8	0,35	1880	445,9	2504,9	8730168,3	2954,7	-0,1
21	0,13	7	0,4	1980	1627,9	2824,9	10914349,5	3303,7	-0,18
22	0,125	9	0,33	1780	1275,4	2808,2	10670533,6	3266,6	-0,2
23	0,115	9	0,36	1780	2145,4	3131,6	13525279,5	3677,7	-0,39
24	0,172	6	0,35	2080	117,5	1539,8	3964514,6	1991,1	0,66
25	0,19	5,5	0,35	2080	1040,3	1632,4	4065455,5	2016,3	0,81
26	0,185	5,5	0,36	2080	1382,6	1742,7	4545012,6	2131,9	0,82
27	0,175	5,5	0,37	2080	-249,4	1062,0	2013579,9	1419,0	0,82
28	0,165	5,5	0,39	2080	-193,6	1020,3	1934361,6	1390,8	0,8
29	0,168	5,5	0,384	2080	-173,3	1017,8	1904586,3	1380,1	0,81
30	0,169	5,5	0,382	2080	-173,7	1019,3	1904671,9	1380,1	0,81
31	0,17	5,5	0,38	2080	-177,5	1022,7	1909715,5	1381,9	0,81
32	0,171	5,5	0,38	2080	182,2	1055,8	1916182,2	1384,3	0,82
33	0,171	5,5	0,382	2080	565,4	1165,8	2211596,6	1487,1	0,82
34	0,171	5,5	0,378	2080	-184,9	1027,6	1919779,8	1385,6	0,81
35	0,171	5,5	0,379	2080	-3,3	1032,0	1882991,0	1372,2	0,82
36	0,21	2,8	0,56	2380	298,4	1140,5	2211934,5	1487,3	0,81
37	0,171	5,5	0,381	2080	371,7	1099,0	2024065,5	1422,7	0,82
38	0,172	5,5	0,38	2080	557,0	1168,6	2216312,6	1488,7	0,82

*Coeficiente de correlación lineal entre las series de floración simuladas y registradas.

En la calibración se controló también que el modelo reprodujera adecuadamente los picos y valles que normalmente ocurren en la producción bananera. De esta manera, usando la función **Jerarquía** de Microsoft EXCEL, se identificaron los picos de las series simuladas y registradas para un periodo de 5 años de simulación, es decir 10 picos.

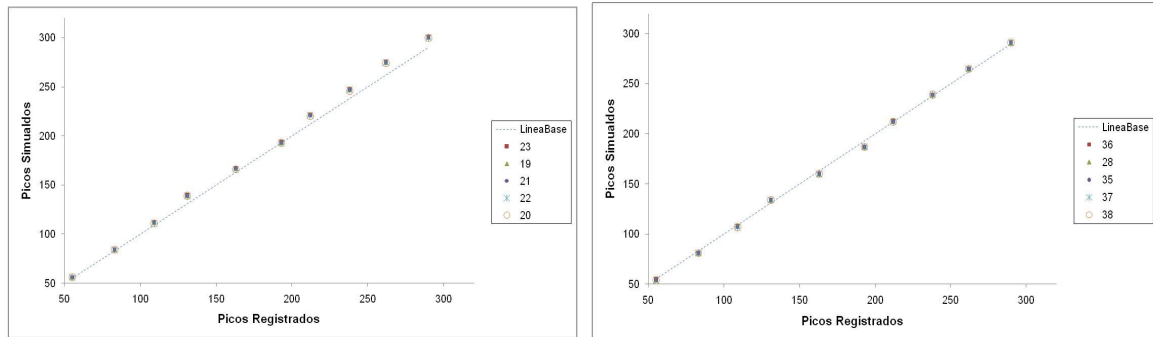


Figura 8.24: Semana al pico simulada y registrada para 10 combinaciones de parámetros

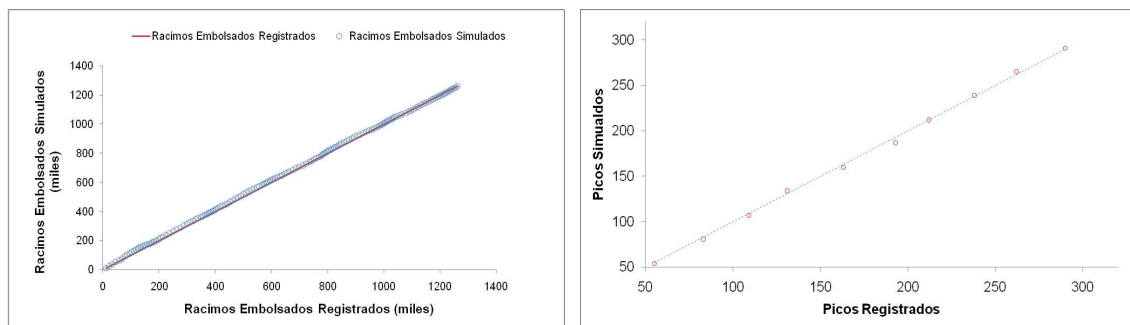
Tabla 8-5: Calibración del SIMBA – POP modificado para la simulación de picos y valles.

	Parámetros de la ecuación de selección			Umbral °C	DM	EMP	ECMP	RECOMP
	AS	BS	CS					
1	0,2	2,8	0,58	2380	-0,2	2	6,6	2,6
2	0,192	2,8	0,6	2380	0,3	2,1	6,5	2,5
3	0,157	2,8	0,7	2380	0,9	1,9	6,7	2,6
4	0,22	2,7	0,55	2380	-1,5	2,1	9,5	3,1
5	0,2	2,7	0,6	2380	-0,3	1,9	6,5	2,5
6	0,16	2,7	0,55	2380	-1,6	2,2	9,6	3,1
7	0,19	2,7	0,55	2380	-1,5	2,1	9,5	3,1
8	0,21	2,7	0,55	2380	-1,5	2,1	9,5	3,1
9	0,215	2,7	0,55	2380	-1,5	2,1	9,5	3,1
10	0,215	2,7	0,57	2380	-0,9	1,9	7,9	2,8
11	0,21	2,7	0,6	2380	-0,2	2	6,6	2,6
12	0,21	2,7	0,58	2380	-0,8	1,8	7,6	2,8
13	0,21	2,8	0,575	2380	-0,2	2	6,6	2,6
14	0,22	2,8	0,55	2380	-0,7	1,9	8,1	2,8
15	0,21	6	0,3	2080	0,3	2,3	8,3	2,9
16	0,152	6	0,4	2080	2,7	3,3	20,1	4,5
17	0,172	6	0,35	2080	1,3	2,7	11,3	3,4
18	0,172	6	0,36	2080	1,7	2,9	13,3	3,6
19	0,12	8	0,38	1880	6	6	56,2	7,5
20	0,13	8	0,35	1880	5,3	5,3	45,1	6,7
21	0,13	7	0,4	1980	5,8	5,8	52,2	7,2
22	0,125	9	0,33	1780	5,6	5,6	51,0	7,1
23	0,115	9	0,36	1780	6,4	6,4	62,6	7,9
24	0,172	6	0,35	2080	1,3	2,7	11,3	3,4
25	0,19	5,5	0,35	2080	-1,2	2	8,2	2,9
26	0,185	5,5	0,36	2080	-1	2	8,0	2,8
27	0,175	5,5	0,37	2080	-0,8	2,2	8,2	2,9
28	0,165	5,5	0,39	2080	-0,4	2,2	7,2	2,7
29	0,168	5,5	0,384	2080	-0,6	2,2	7,4	2,7



30	0,169	5,5	0,382	2080	-0,6	2,2	7,4	2,7
31	0,17	5,5	0,38	2080	-0,6	2,2	7,4	2,7
32	0,171	5,5	0,38	2080	-0,6	2,2	7,4	2,7
33	0,171	5,5	0,382	2080	-0,6	2,2	7,4	2,7
34	0,171	5,5	0,378	2080	-0,7	2,3	8,7	2,9
35	0,171	5,5	0,379	2080	-0,6	2,2	7,4	2,7
36	0,21	2,8	0,56	2380	-0,3	2,1	7,1	2,7
37	0,171	5,5	0,381	2080	-0,6	2,2	7,4	2,7
38	0,172	5,5	0,38	2080	-0,6	2,2	7,4	2,7

Del análisis se escoge la combinación de parámetros 35, como la que permite con mayor precisión, simular el florecimiento para las condiciones planteadas. La curva de masa de racimos embolsados, el ajuste en las fechas de picos y la serie de tiempo y los ciclos de racimos embolsados y cosechados para la combinación de parámetros escogida se muestra a continuación.



A)

B)

Figura 8.25: A) Curva de racimos embolsados acumulados para la combinación de parámetros 35. B) Semana al pico simulada y registrada para la combinación de parámetros 35

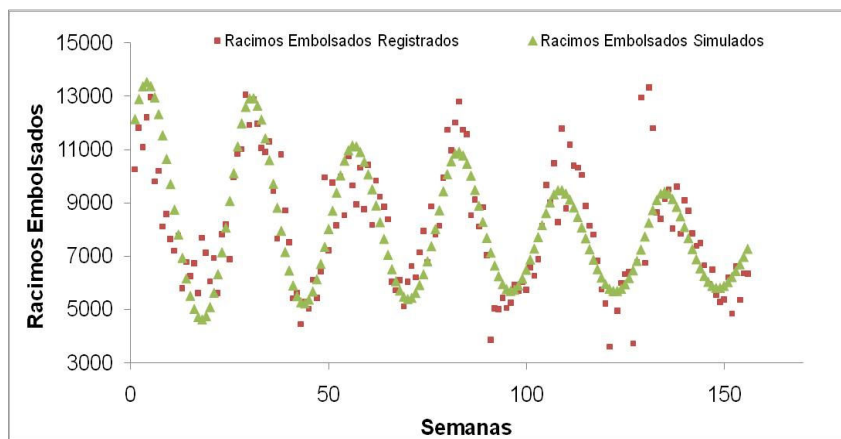
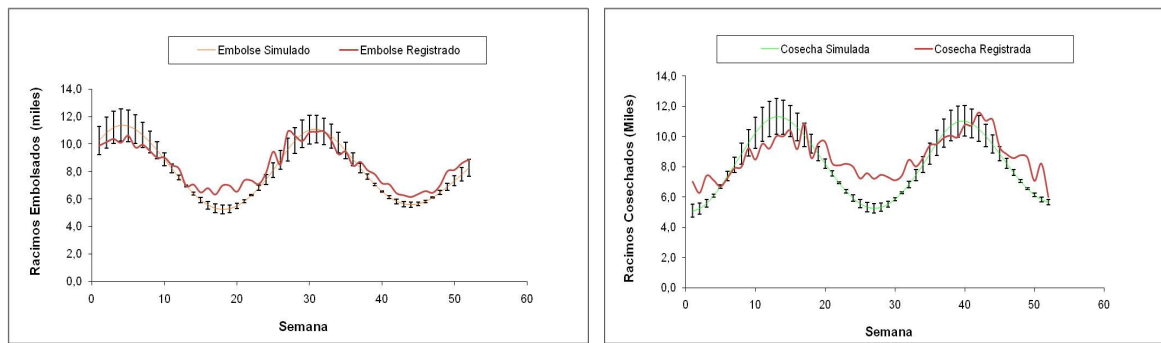


Figura 8.26: Serie de Racimos Simulados y Registrados para la Finca Doña Ángela.



A)
B)
Figura 8.27: Curva de racimos embolsados acumulados para la finca Doña Ángela.
B) Semana al pico simulada y registrada para la finca Doña Ángela.

8.2.2 Validación del modelo SIMBA – POP modificado.

Para validar el comportamiento del modelo se realizó una simulación para las condiciones de la finca María Rosario.

Generalidades de la Finca María Rosario.

Ubicación:

Latitud: 7° 54' 01,45" N.

Longitud: 76 40' 17,59" W.

Altura: 19 m.s.n.m.

Área Bruta: 215,65 Ha.

Área Neta: 171,98 Ha.

Serie de Embolse: Inicio: semana 01/2001 Finaliza: Semana 23/2008

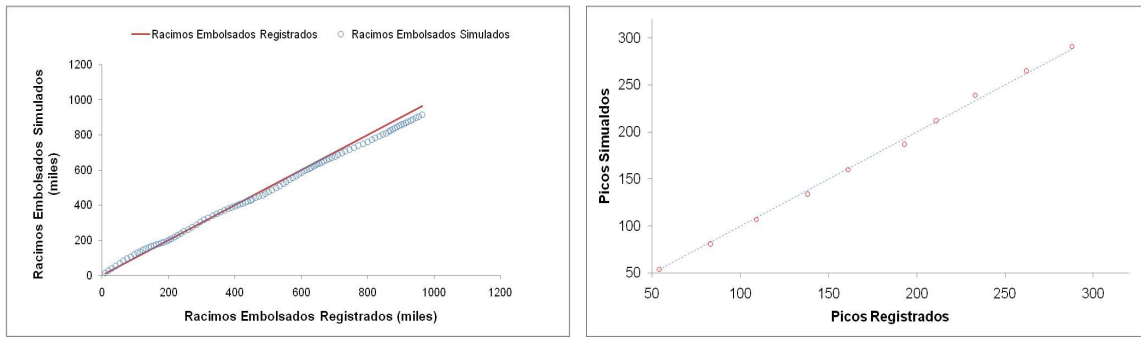
Serie de Cajas Exportadas: Inicio: semana 01/1999 Finaliza: Semana 22/2008

Serie de ratio: Inicio: semana 01/1999 Finaliza: Semana 22/2008

Textura: La mayor parte de la plantación está sembrada sobre texturas finas a moderadamente finas, con unas pequeñas áreas de texturas medias a gruesas.

Precipitación promedio: 2389 mm.

Los resultados muestran que el modelo predice adecuadamente las fechas de picos y valles, aunque a largo plazo subestima la magnitud del embolse, condición ya identificada en el proceso de calibración. El modelo tiene un periodo de predicción de aproximadamente 2 años.



A)

B)

Figura 8.28: A) Curva de racimos embolsados acumulados para la finca María Rosario. B) Semana al pico simulada y registrada para la finca María Rosario

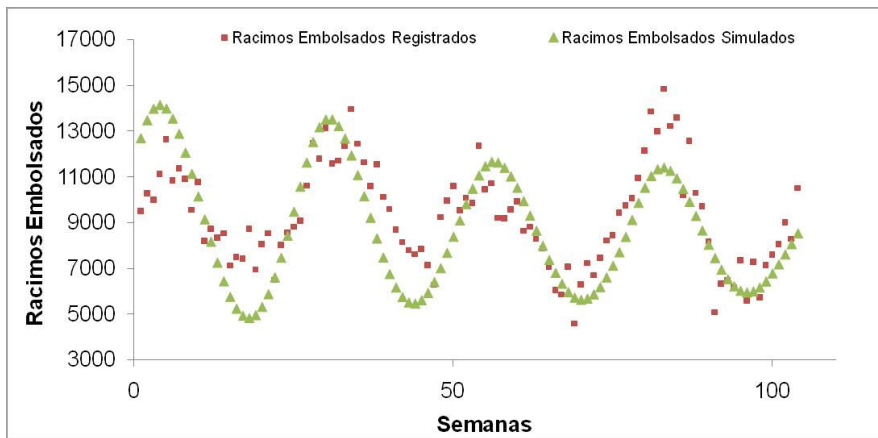
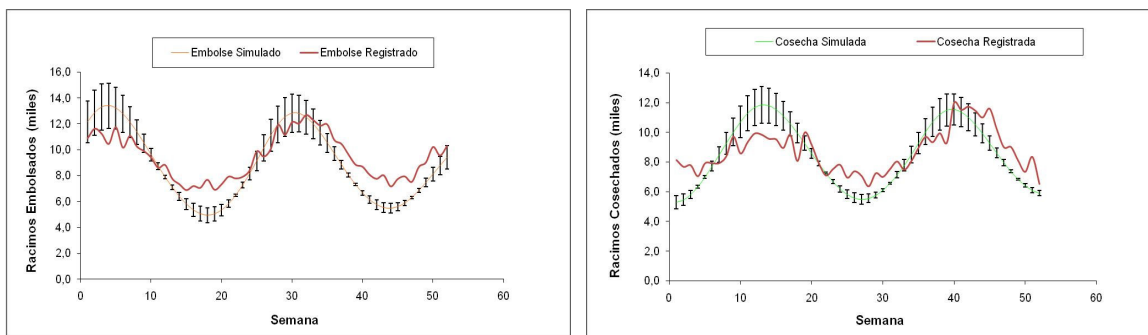


Figura 8.29: Serie de racimos simulados y registrados para la finca María Rosario.



A)

B)

Figura 8.30: Ciclo de racimos embolsados y cosechados para la finca María Rosario. A) Racimos embolsados simulados y registrados. B) Racimos cosechados simulados y registrados.



8.3 Simulación de escenarios de producción bananera en Urabá (Colombia) según las fases del fenómeno ENSO

Cualquier cultivo agrícola a campo abierto, es afectado por la variabilidad de las condiciones ambientales. El cultivo de banano en el Urabá Antioqueño es susceptible a eventos estresantes, situación agravada por la deficiencia en infraestructura de riego en la zona, si sumamos a esto, los cambios en el régimen de lluvia por eventos naturales y recurrentes, como ocurre con el ENSO, que pueden verse amplificados y hacerse más frecuentes por efecto del cambio climático global, el aumento en la temperatura ambiental y el mismo incremento en la concentración atmosférica del CO₂, obtenemos un escenario donde se alteran las condiciones para el desarrollo del cultivo que implican alteraciones en sus procesos fisiológicos y que afectan la cantidad, calidad y distribución de la producción de banano en el Urabá Antioqueño. De esta manera, 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. Se usó el modelo SIMBA-POP calibrado, para simular la dinámica de la población en un cultivo de banano bajo la influencia de las tres fases del ENSO: Año Normal, El NIÑO y La NIÑA.

Adicional a la información aportada por C.I Banacol S.A. se uso información aportada por CENIBANANO de temperatura máxima y mínima diaria en el periodo 01/01/1996 y 31/12/2003.

Se usó el modelo calibrado y validado para modelar el comportamiento del embolse (floreCIMIENTO) y cosecha en una plantación establecida de banano. La simulación se realizó bajo las siguientes condiciones:

- 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 mantuvo constante durante toda la simulación.
- Se identificaron los eventos El Niño y La Niña ocurridos entre 01/01/1996 y 31/12/2003, según el registro histórico del ONI. Se identificaron como años Niño 1997 – 1998 y 2002 – 2003, y como años Niña 1998 – 1999 y 1999 – 2000.
- Se calculó el ciclo anual de las temperaturas medias, y con esta serie se corrió el modelo por 5 años, Con la información resultante se determinó el ciclo anual medio de florecimiento y cosecha.
- Para cada uno de los años El NIÑO y La NIÑA se extrajo la serie de tiempo de temperaturas medias, se corrió el modelo por 5 años y se determinó el ciclo anual medio de florecimiento y cosecha.
- Como base de comparación para la simulación se calculó el ciclo anual de florecimiento y cosecha del banano en Urabá usando información histórica de 10



fincas distribuidas latitudinalmente en el eje bananero. Por tal motivo se calculó el embolse y la cosecha por unidad de área.

La figura 8.31 muestra los ciclos anuales de racimos embolsados y cosechados simulados y registrados. Nótese el buen comportamiento del modelo para predecir los ciclos de embolse y cosecha promedio de las 10 fincas analizadas.

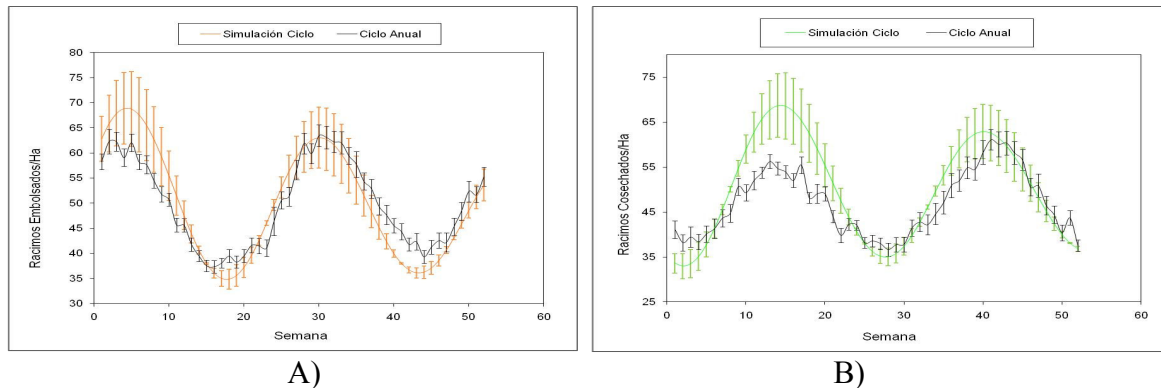


Figura 8.31: A) Ciclo anual de racimos embolsados y B) Ciclo anual de racimos cosechados: simulados y registrados (promedio de 10 fincas).

La figura 8.32 muestra el ciclo anual de los racimos embolsados y cosechados bajo el efecto sostenido de las tres fases del ENSO.

Durante El NIÑO el ciclo de embolse, presenta un adelantamiento (los picos ocurren 1 a 2 semanas antes) respecto al ciclo anual normal. Se nota una mayor variabilidad representada por el tamaño de las barras de error. Este comportamiento obedece a un aumento leve en la temperatura media respecto a la temperatura de año normal, lo que acelera los procesos de rebrotes, floración y cosecha debido a que se alcanzan con mayor rapidez las unidades térmicas necesarias para iniciar cada uno de los procesos.

Durante La NIÑA el ciclo de embolse, presenta un atraso respecto al ciclo anual. Se advierte una mayor variabilidad. El retraso obedece a una disminución en la temperatura media respecto a la temperatura del año normal, por lo que transcurre un mayor tiempo para alcanzar las unidades térmicas necesarias para iniciar cada uno de los procesos.

En los ciclos de cosecha tanto para las series El NIÑO como La NIÑA, se advierte la presencia de unos picos y valles (anómalos). El análisis de las series y de lo sucedido en las cohortes individuales en el modelo, permitió reconocer que dichos picos corresponden a una concentración de cosecha, debido a que varias cohortes alcanzan la madurez y son cosechadas al mismo tiempo. Esta situación es posible reconocerla en el modelo por la inclusión de las unidades térmicas como conductoras de los procesos fisiológicos. En un cultivo donde la programación de cosecha es realizada por calendario, independiente de las condiciones climáticas, es posible cosechar racimos con un grado de madurez diferente al esperado lo que puede ocasionar pérdida de fruta por maduración en el proceso de transporte desde el Urabá Antioqueño hasta el sitio de destino. Por lo tanto la gestión del



cultivo debería incorporar herramientas de simulación como SIMBA-POP en la programación de actividades de manejo, lo cual reduciría la incertidumbre asociada a la programación por calendario, sobre todo bajo el efecto de El Niño y La Niña, y el cambio climático.

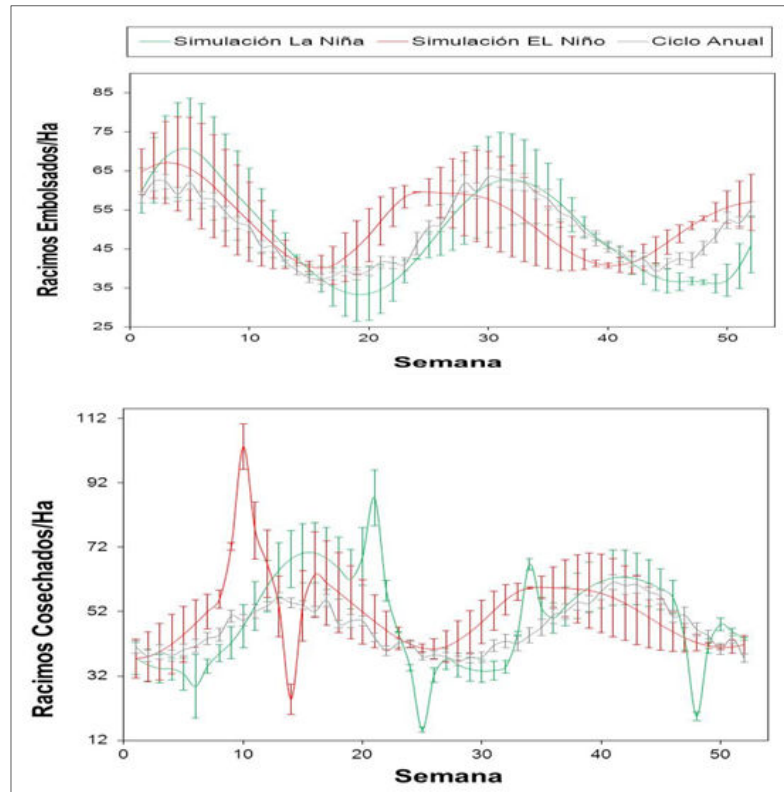


Figura 8.32: Ciclo anual de racimos embolsados y cosechados para años El NIÑO y La NIÑA.