

# MODELO PARA SIMULAR LA PRODUCCIÓN POTENCIAL DEL CULTIVO DEL CAFÉ EN COLOMBIA



GERENCIA TÉCNICA  
PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ  
"Pedro Uribe Mejía"

**Cenicafé**

Chinchiná - Caldas - Colombia

Fondo Nacional del Café

Boletín Técnico

Nº 33

2009



## COMITÉ NACIONAL

Período 1º enero/07-diciembre 31/10

Ministro de Hacienda y Crédito Público  
Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural  
Ministro de Comercio, Industria y Turismo  
Director del Departamento Nacional de Planeación

Juan Camilo Restrepo Salazar  
Mario Gómez Estrada  
Carlos Alberto Gómez Buendía  
Carlos Roberto Ramírez Montoya  
César Eladio Campos Arana  
Darío James Maya Hoyos  
Jaime García Parra  
Héctor Falla Fuentes  
Fernando Castrillón Muñoz  
Javier Bohórquez Bohórquez  
Crispín Villazón de Armas  
Ramón Campo González  
Jorge Cala Roballo  
Hernán Román Calderón  
Alfredo Yáñez Carvajal

### **Gerente General**

GABRIEL SILVA LUJÁN

### **Gerente Administrativo**

LUIS GENARO MUÑOZ ORTEGA

### **Gerente Financiero**

JORGE SUESCÚN POZAS

### **Gerente Comercial**

JUAN LUCAS RESTREPO IBIZA

### **Gerente Técnico**

ÉDGAR ECHEVERRI GÓMEZ

**Director Programa de Investigación Científica**  
**Director Centro Nacional de Investigaciones de Café**  
GABRIEL CADENA GÓMEZ

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.

## **UNA PUBLICACIÓN DE CENICAFÉ**

Editor: Sandra Milena Marín, I.A.  
Diseño y  
Diagramación: María del Rosario Rodríguez Lara  
Imprenta: Litoprisma

---

Editado en Enero de 2009  
1.500 ejemplares

©FNC- Cenicafé 2009



GERENCIA TÉCNICA  
PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ  
"Pedro Uribe Mejía"

**Cenicafé**

# MODELO PARA SIMULAR LA PRODUCCIÓN POTENCIAL DEL CULTIVO DEL CAFÉ EN COLOMBIA

*Esther Cecilia Montoya-Restrepo\**; *Jaime Arcila-Pulgarín\*\**;  
*Álvaro Jaramillo-Robledo\*\*\**; *Néstor Miguel Riaño-Herrera\*\*\*\**;  
*Francisco Quiroga-Zea\*\*\*\*\**

---

\* Investigador Científico III. Biometría. Cenicafé.

\*\* Investigador Principal. Fitotecnia. Cenicafé.

\*\*\* Investigador Científico III. Agroclimatología. Cenicafé.

\*\*\*\* Investigador Científico III. Fisiología Vegetal. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

\*\*\*\*\* Profesor Emérito. Universidad del Valle.



# CONTENIDO

**6** INTRODUCCIÓN

---

**7** **CAPÍTULO I. Generalidades para la construcción de modelos de simulación en cultivos agrícolas**

**11** **CAPÍTULO II. Aplicación de la modelación en cultivos**

**13** **CAPÍTULO III. Modelación en café**

**15** **CAPÍTULO IV. Estrategia para la construcción del modelo de simulación para el cultivo del café**

**18** **CAPÍTULO V. Desarrollo del modelo de simulación para la producción potencial: Nivel de producción 1**

**44** AGRADECIMIENTOS

**45** LITERATURA CITADA



# INTRODUCCIÓN

Desde la revolución verde, a finales de la década de los años sesenta, en el sector agrícola no se disponía de nuevas tecnologías que impactaran el futuro de la práctica de la agricultura, como la ingeniería Genética y la Agrónica.

La Ingeniería Genética permite manipular los genes de las plantas y otros seres vivos y se usa para diseñar nuevos organismos con características deseables, difíciles de obtener por medio de los métodos convencionales de mejoramiento. La Agrónica, es decir, la informática aplicada a la agricultura, proporciona herramientas que permiten una mejor comprensión y control de los sistemas de producción agrícola, tema en el cual se hará énfasis en este trabajo.

Durante los últimos años, debido a la disponibilidad de computadoras, a los programas de cómputo y al conocimiento comprensivo de cómo responden las plantas al clima y al suelo, ha sido posible desarrollar modelos dinámicos para simular el crecimiento y la producción de muchos cultivos. Estos modelos permiten estudiar e integrar los aspectos simples como los complejos de las interacciones entre la planta y su ambiente, y proporcionan a las personas encargadas del manejo del sistema, un marco teórico de referencia para la toma de decisiones.

Un modelo es una representación matemática de un sistema y la modelación es el proceso para desarrollar dicha representación. La simulación son los procesos necesarios para que el modelo opere y produzca una imitación del mundo real. Para Goudriaan y van Laar (47), Jones *et al.* (61), Penning de Vries (82) y Penning de Vries y Spitters (83), la simulación de la producción de un cultivo se puede definir como el desarrollo y la utilización de modelos del cultivo para estimar su crecimiento, desarrollo y producción.

Los investigadores usan estos modelos para estudiar diferentes problemas relacionados con los sistemas de producción como por ejemplo, el manejo del riego, de las plagas y enfermedades, las programación de cosechas, la planificación del uso de la tierra, la rotación de cultivos y los pronósticos de cosecha. En su estado más avanzado, estas aplicaciones se han denominado como Agricultura de Precisión.

La División de Planeación de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (33), considera que uno de los aspectos que ha tenido relevancia en los últimos tiempos ha sido el de los pronósticos de cosecha, por dos motivos principales: la gran variabilidad de las cosechas registradas, como consecuencia de las nuevas áreas y de las renovaciones por el envejecimiento de las plantaciones, lo cual reduce drásticamente los rendimientos, y por el hecho de que la disminución de la producción sea tal que ésta se equilibra con las exportaciones potenciales; igualmente, resalta la importancia de la división de la zona cafetera en áreas homogéneas desde el punto de vista de suelo, clima y relieve. Considera como un elemento clave para la toma de decisiones, el pronóstico de cosechas, y plantea que su conocimiento es cada vez más crucial.

Por lo tanto, el esfuerzo de un trabajo en la construcción de un modelo de tipo explicatorio, es decir, tener un modelo de simulación dinámico basado en procesos físicos, químicos y

biológicos de la planta y el cultivo del café, compensaría con sus contribuciones a la solución de importantes problemas del cultivo, convirtiéndose en una herramienta de trabajo para los siguientes usuarios: investigadores, para la simulación de experimentos; del Servicio de Extensión, para la optimización de recursos; de los agricultores, para el mejoramiento de la productividad; de la Gerencia, para el diseño de estrategias de mercadeo; y de los administradores para la asesoría en la toma de decisiones respecto al cultivo.

El objetivo de este trabajo, fue el de construir un modelo de simulación matemático para el cultivo del café, con el cual se representa: el crecimiento vegetativo y reproductivo, la distribución de la materia seca, el desarrollo foliar, el crecimiento del fruto y la producción, con un alcance predictivo.

## CAPÍTULO I.

### Generalidades para la construcción de modelos de simulación en cultivos agrícolas

Las técnicas de modelación y simulación del crecimiento de los cultivos y sus respuestas al manejo no han sido utilizadas ampliamente en Colombia, por lo cual, es de gran interés su implantación tanto a nivel universitario como de las instituciones encargadas de la investigación en cultivos, con el objetivo de mejorar la investigación y el proceso de toma de decisiones en todos los niveles del sector agropecuario (21). La investigación se beneficiará al tener la posibilidad de simular experimentos y tratamientos para un buen número de cultivos, y de esta manera poder escoger, en forma preliminar, aquellos que muestren la tendencia a una mayor probabilidad de éxito, ahorrando además tiempo y recursos. Por último, las empresas agrícolas se beneficiarán al poder simular situaciones de riesgo y opciones de manejo, y así mejorar la eficiencia de la administración de las fincas al tomar decisiones con un mejor soporte técnico.

Con dicho propósito, un grupo interdisciplinario de la Universidad del Valle y del Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé, ha trabajado en el desarrollo de un **Modelo de simulación del crecimiento y desarrollo de la planta de café** (87), de acuerdo con la filosofía de modelación aplicada al manejo de los cultivos.

El desarrollo del modelo, ilustrado en el texto que se presenta a continuación, está apoyado en los diferentes trabajos realizados sobre el cultivo del café por Cenicafé, durante más de 50 años de investigación. En primera instancia, para integrar estos conocimientos y generar otras investigaciones, se planteó un modelo de simulación matemático de la producción potencial del cultivo del café en Colombia.



El arte de modelar, según Monteith (75) y Passioura (81), consiste en simplificar al máximo posible y en seleccionar sólo aquellas partes de la realidad que son esenciales para la situación que se estudia. Ningún modelo es capaz de resolver todas las situaciones y, en consecuencia, el diseño, la escala y el grado de complejidad deben estar de acuerdo con la aplicación que se pretenda dar con la cantidad de información y el tiempo disponible para su construcción y evaluación.

Cuando el modelo se complementa con algunos programas especializados, se puede utilizar como herramienta:

**De investigación:** Para la integración de conocimiento interdisciplinario, documentación de experimentos, como ayuda al mejoramiento genético, análisis del impacto del clima en la brecha de producción, impacto sobre la productividad, el clima, plagas y enfermedades, costos de producción y precios.

**En el manejo de sistemas de cultivo:** Ayuda al manejo cultural, en el manejo del riego, toma de decisiones, en agricultura de precisión, en el manejo de riesgos mediante el análisis de la variabilidad de la producción entre años, simulación de experimentos bajo diferentes escenarios de manejo, o de variabilidad climática.

**Para el análisis de políticas y estrategias:** Decisiones estratégicas sobre las épocas de siembra, la selección de variedades o cultivares, la inversión en riego, los pronósticos de cosecha, la selección de las mejores opciones de manejo sin riesgo ambiental y la evaluación de efectos climáticos.

**En el manejo específico de sitio:** Con equipos de control automático y los sistemas de soporte de decisiones, los agricultores podrán ejercer un control de su finca en áreas reducidas y aplicar solamente lo necesario y en el momento oportuno.

De esta forma, la integración de los modelos de cultivos con sistemas expertos, sensores de posición geográfica y sistemas de información geográfica, están volviendo realidad una nueva tendencia en el campo agrícola, denominada Agricultura de Precisión.

De acuerdo con los objetivos planteados para el modelo que se busca construir, los modelos matemáticos se pueden clasificar en dos grandes categorías: **Modelos empíricos o correlativos**, los cuales describen el comportamiento de la planta o del cultivo basados en las observaciones directas, sin referirse a algún fundamento de estructura biológica o física; y **modelos explicatorios o causales**, que describen el comportamiento de la planta o del cultivo basados principalmente en procesos o mecanismos conocidos de tipo biológico, químico o físico; éstos son el sostén fundamental del crecimiento y el desarrollo, y buscan representar las relaciones de causalidad en forma explícita (37, 62, 111, 112). Los modelos de simulación que se han desarrollado hasta el momento son una mezcla de los dos tipos de modelos. La tendencia actual predominante es la de construir modelos que sean principalmente explicatorios, es decir, modelos con fundamento cada vez mayor, en mecanismos o procesos; la razón de ello está en su mayor utilidad en la solución de un amplio rango de problemas. Muchas de las aplicaciones envuelven interpretaciones que sólo pueden hacerse con este tipo de modelos. Por otra parte, el avance en el desarrollo y construcción de equipos de computación,

con suficiente capacidad para procesar esta clase de modelos, ha sido un factor determinante para favorecer esta tendencia en los últimos años (96, 97, 111).

Los modelos de simulación de tipo explicatorio se construyen sobre la base de una estructura organizativa de tipo jerárquico, lo que los hace factibles de desarrollar en la agricultura. Los submodelos de un modelo están conectados según los niveles de la organización (ecosistema, cultivo, planta, órgano, tejido) y conducen al entendimiento de los sistemas en los niveles más altos, sobre la base del conocimiento adquirido por la investigación y la experimentación en los sistemas de los niveles más bajos. Por ejemplo, se pueden entender las propiedades de los cultivos estudiando los procesos de las plantas individuales, pero para lograr este entendimiento debe encontrarse un esquema que relacione los procesos de la planta y el comportamiento del sistema a nivel del cultivo.

Cualquier nivel del esquema jerárquico puede considerarse como un sistema compuesto de subsistemas, correspondientes al nivel más bajo, o como un subsistema de un sistema correspondiente al nivel más alto. Sus conexiones deben hacerse teniendo en cuenta las propiedades de los sistemas jerárquicos:

- 1) Cada nivel tiene sus propios conceptos, principios y lenguaje.
- 2) Cada nivel es una integración de subsistemas del nivel más bajo.
- 3) La relación entre niveles no es simétrica: la operación del nivel más alto requiere del nivel más bajo para funcionar efectivamente, pero no a la inversa (37, 114).

La construcción del modelo se basa en el supuesto de que en cualquier momento los estados del sistema pueden ser descritos cuantitativamente y que los cambios en dichos estados pueden describirse por medio de ecuaciones matemáticas. Esto conduce a modelos en los cuales se distinguen variables de estado, variables de flujo y variables exógenas o de acción; estas últimas, caracterizan el efecto del medio ambiente sobre el sistema y deben ser seguidas de manera continua (por ejemplo, las variables de clima).

Cada variable de estado está asociada con variables de flujo, que caracterizan su tasa de cambio para un cierto instante, como resultado de un proceso específico. Estas variables representan flujos de materia o energía entre variables de estado como, por ejemplo, la biomasa vegetal. Los valores de las variables de flujo dependen a su vez de las variables de estado y de las exógenas, de acuerdo con leyes o reglas que están basadas en el conocimiento de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en el sistema, y no en el análisis estadístico del comportamiento del sistema que se estudia.

Esta es la diferencia más importante entre modelos que buscan describir y modelos que intentan explicar el sistema. Las variables de estado se obtienen integrando las variables de flujo. Los modelos de simulación se representan corrientemente por diagramas relacionales denominados diagramas de Forrester, que permiten visualizar las conexiones y la naturaleza de las diferentes variables del sistema que se modela (3, 36, 115).

Los modelos representan simplificaciones de los sistemas y esta simplificación se manifiesta por el número limitado de variables de estado que se deben considerar y manejar en un modelo.

Hasta el momento, los grupos interdisciplinarios más importantes que trabajan la modelación de cultivos agrícolas, como: Department of Theoretical Production Ecology, Agricultural University, Wageningen, the Netherlands; Centre for Agrobiological Research, Wageningen, the Netherlands; International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer, IBSNAT, Project, University of Hawaii, Honolulu, HI; International Fertilizer Development Center, IFDC, Muscle Shoals, Alabama; Michigan State University, East Lansing, Michigan; USDA- ARS Crop Simulation Research Unit, Mississippi State University, entre otros, siguen en lo fundamental, la estrategia propuesta por Wit de y Penning de Vries (116); ésta se centra principalmente para caracterizar la producción y el crecimiento del cultivo, en la producción de materia seca y no tanto en el desarrollo morfológico. Se definen cuatro niveles de producción. Estos niveles en un orden de productividad descendiente son:

- **Nivel de producción 1:** Corresponde a la situación de producción potencial alcanzada en condiciones con suficiente y adecuada cantidad de nutrientes y agua en el suelo, durante el período de crecimiento. En estas condiciones la tasa de crecimiento es determinada por las condiciones de clima y en particular, por la radiación absorbida y la temperatura. Los procesos más importantes en este nivel son: asimilación de  $\text{CO}_2$ , mantenimiento y crecimiento, distribución de los asimilados y desarrollo del área foliar.

- **Nivel de producción 2:** Corresponde a la situación en la que el crecimiento está limitado por el déficit de agua, por lo menos en un período importante del crecimiento y el desarrollo del cultivo. Por lo general, se presenta en cultivos bien fertilizados pero con déficit de agua en el suelo. La principal variable de estado es la del balance hídrico en la planta y el suelo. Los procesos más importantes son: transpiración y su acoplamiento con la asimilación de  $\text{CO}_2$  y la pérdida o ganancia de agua por el suelo a través de evaporación, drenaje y escorrentía.

- **Nivel de producción 3:** El crecimiento está limitado por déficit de N, para por lo menos un período importante del crecimiento y el desarrollo del cultivo, y por agua o condiciones de clima para el resto del período de crecimiento. Los elementos importantes en estos sistemas son las formas de nitrógeno (N) en el suelo y la planta. Los procesos clave son: las transformaciones de los componentes de N en el suelo a formas que son aprovechables por las plantas, la lixiviación, la absorción de N por raíces, la disponibilidad y la redistribución de N dentro de la planta.

- **Nivel de producción 4:** El crecimiento también está limitado por la baja disponibilidad de fósforo u otros minerales, para por lo menos una parte importante del período de desarrollo del cultivo. Esta situación ocurre, por lo general, en áreas altamente explotadas donde no se fertiliza. Los elementos importantes aquí son los contenidos de minerales en el suelo y las plantas. Los procesos clave son: las transformaciones en formas orgánicas e inorgánicas de diferentes fuentes, la absorción de minerales por las raíces y la respuesta de las plantas a su suministro.

No se espera que todos los casos de la vida práctica se ajusten a uno de estos niveles; lo que se busca es una simplificación útil y práctica que permita llevar los casos concretos a uno de ellos.

Este procedimiento básicamente sigue la ley del mínimo de Liebig, para describir el efecto de los factores limitantes en el crecimiento de las plantas (89, 96, 97, 116).

## CAPÍTULO II.

### Aplicación de la modelación en cultivos

En la actualidad se encuentran disponibles modelos de simulación, para un grupo numeroso de cultivos, entre otros: ALSIM, para Alfalfa; GOSSYM, para algodón; CERES, para cebada, maíz, trigo, arroz, sorgo y millo; AUSCANE, para caña de azúcar; POTATOE, para papa; SUBSTOR, para yuca y ñame; SOYGRO y GLYCIM, para soya; PNUTGRO, para maní; y BEANGRO, para fríjol (111). La mayoría de ellos son una mezcla de modelos empíricos y mecánicos (16). El modelo SUCROS fue desarrollado en Holanda, como un sistema simple y universal para modelar el crecimiento de los cultivos (99).

Para la aplicación de estos modelos, además de un buen diseño, es necesario un complemento eficiente con programas de cómputo, que permitan su integración en un sistema de soporte de decisiones, para que el usuario pueda utilizarlos fácilmente, con unos requerimientos mínimos de tiempo y bajo costo, que a la vez le proporcione respuestas simples y que satisfagan sus necesidades.

Algunos modelos como el GOSSYM han sido conectados con sistemas expertos como el COMAX (Crop Management Expert), para conformar un sistema de soporte de decisiones para el manejo del cultivo, que se conoce como GOSSYM/COMAX, (70). A este sistema se le incorporó una aplicación para decisiones en el manejo de insecticidas, denominada GOSSYM / COMAX / WHIMS (90).

Los modelos GOSSYM y GLYCIM, han sido evaluados en fincas comerciales como ayuda para la toma de decisiones en el manejo del cultivo.

Otro sistema de gran interés es el desarrollado por IBSNAT (51), denominado DSSAT (Decisión Support System for Agrotechnology Transfer), el cual combina modelos de simulación para cerca de 20 cultivos, bases de datos de suelos, clima y programas para la evaluación de estrategias, integrados en una interfase, para uso en microcomputadores.

La tendencia actual es hacia el desarrollo de modelos versátiles, de fácil manejo, que le permitan al usuario un rango amplio de aplicaciones, sin necesidad de modificar la estructura del modelo.

Whisler *et al.* (111), comentan cómo la construcción de modelos de simulación para algodón, soya y trigo, ha permitido identificar numerosos vacíos de conocimientos y cómo con base en ellos, se diseñaron y ejecutaron experimentos e investigaciones para resolverlos. Además, ilustran con un buen detalle ciertos aspectos de su aplicación en casos como las pruebas de

efectos de diferentes estrategias de manejo de suelos y sus relaciones con la erosión; en programas de reproducción, en un sentido exploratorio, explicando la naturaleza de las respuestas en rendimiento e identificando las condiciones medioambientales, bajo las cuales se producen incrementos de producción; en pruebas de teorías fisiológicas, sobre todo para obtener información que no puede lograrse mediante mediciones directas; en el análisis del impacto del ataque de insectos en el crecimiento y rendimiento de los cultivos, en la transferencia de tecnología al productor y como instrumento de valiosa ayuda en la toma de decisiones en fincas, para la aplicación de fertilizantes y otras prácticas de manejo.

Grable (48), enfatiza que una de las más importantes aplicaciones futuras de los modelos de cultivo será el pronóstico de la cosecha, ilustrándola con los casos a gran escala de Erickson's Field Notes Crop Reporting Service y los programas del U.S. Department of Agriculture.

Syvertsen *et al.* (104), ilustran las aplicaciones y ventajas de un modelo para simular el crecimiento y la producción en árboles de cítricos, desarrollado en la Universidad de Florida, principalmente, en la predicción de los efectos de las variaciones de las condiciones del clima, en el crecimiento anual y la producción de frutos, en la comparación de rendimientos de huertos para diferentes densidades y diferentes alturas de los árboles, en las decisiones sobre las medidas de control de plagas y en la determinación de áreas específicas donde se deben profundizar las investigaciones. Además, expresan que una de las mayores ventajas del modelo es la de llevar a los investigadores a considerar el árbol o el cultivo como una entidad dinámica y no como una simple colección de componentes individuales o procesos.

El IFDC (52, 53) informa que en tres institutos, los científicos han logrado un método moderno de bajo costo para pronosticar el rendimiento de los cultivos, con base en modelos simulados en computadora, para los principales cereales y legumbres del mundo. Estos modelos, se comenta, pueden seguirle el paso a los resultados de las combinaciones de irrigación, fertilización y otros factores de manejo, y utilizarlos para ayudar a los agricultores a lograr respuestas más confiables a sus preguntas concernientes con los probables resultados de sus prácticas actuales de manejo o de cualquier otro cambio que ellos necesiten hacer para poder obtener mejores resultados agronómicos. El IFDC (53) igualmente informa sobre el "modelo aroide" que se está desarrollando sobre la producción de dos raíces: el tanier (*Caladium sagittae-folium*), común en la zona del Caribe, y el taro (*Colocasia esculenta*), común en la zona del Pacífico, y se comenta cómo los modelos eliminan la duplicación en la experimentación, obteniéndose un gran beneficio al disminuirse el número de programas experimentales y poder dedicar dichos recursos hacia otros aspectos de la investigación; se considera que uno de sus valores principales está en la contribución que se logra en la transferencia de agrotecnología de un lugar a otro.

Thornton (105) presenta una excelente revisión crítica de los alcances y limitaciones de las aplicaciones de los modelos de simulación de cultivos en la investigación y desarrollo agrícolas. Hace especial referencia al papel de los modelos en la transferencia tecnológica y en la optimización de las investigaciones de campo, ilustrando conceptualmente todo un marco de referencia, clasificando las opciones de aplicación por niveles. Además, considera que el éxito en estas aplicaciones depende de que se encuentren soluciones a algunos problemas, como la de incrementar la sensibilidad de los modelos a factores como el de las cosechas múltiples, el de la incorporación de residuos y el de las interacciones del cultivo con plagas y

enfermedades. Presenta una serie de proyectos de aplicaciones del IFDC como, por ejemplo, eficiencia del uso de la fertilización en cereales, en países latinoamericanos (Argentina, Uruguay y Brasil) y África (Malawi y Kenia), para niveles regionales y en los campos de cultivo y las pruebas en fincas, en sistemas de producción de cereales en Guatemala. Finalmente, expresa que la modelación es una herramienta como cualquier otra, y que es adecuada para resolver algunos problemas.

En la bibliografía consultada no se encontraron trabajos de simulación dinámica en el cultivo del café, con el enfoque y naturaleza de modelos explicatorios, como los presentados en esta revisión.

## CAPÍTULO III.

### Modelación en café

Con relación al cultivo del café, Reffye *et al.* (91), investigadores del Laboratorio de Modelación de GERDAT y del Instituto de Investigaciones de Café, Cacao y otras plantas estimulantes (IRCC), han desarrollado trabajos de modelación sobre la arquitectura de *Coffea canephora* en las plantaciones del IRCC, en Costa de Marfil; estos autores analizaron cuantitativamente el desarrollo de una planta de café, considerando tres procesos: crecimiento, muerte y ramificación, los cuales son tratados estocásticamente, y su interés estuvo principalmente en las respuestas de la planta con relación a su arquitectura, y no consideraron los otros procesos fisiológicos contenidos en los modelos de simulación dinámica. Es un enfoque de tipo botánico y no consideran la materia seca ni las variables de clima, pero sí consideran el número de nudos, la longitud de entrenudos, el número de ramas y el número de frutos, aplicándoles ajustes de distribuciones probabilísticas de tipo discreto y los métodos de Montecarlo. Buscan aplicarlos a casos como el de la determinación de densidades óptimas de la plantación y de tamaños adecuados de los árboles.

Para el cultivo del café en Colombia, Jaramillo *et al.* (56) no aplicaron directamente el modelo sugerido por la FAO (30); y éste a su vez, está basado en el propuesto por Wit de (113), en el cual se relacionan los elementos climáticos (agua, radiación, temperatura), con los procesos de fotosíntesis y respiración, efectuados por la planta. Es quizás, el trabajo de mayor avance en los tópicos relacionados con el pronóstico de la producción del cultivo del café; en él se evalúa cuantitativamente la influencia del clima en la producción de café en la Estación Central Naranjal de Cenicafé, localizada en el municipio de Chinchiná, para el período 1964-1986, logrando resultados de asociación entre la producción relativa (producción observada / producción máxima), con el índice de biomasa (biomasa observada / biomasa máxima).

Gutiérrez *et al.* (49), para el análisis tritrófico del café (*Coffea arabica*), de la broca del café (*Hypothenemus hampei*) y de sus parasitoides, trabajaron un modelo para la planta, basados con datos de campo de materia seca, del Brasil, y los modelos para la broca y sus parasitoides



con datos de laboratorio y de la literatura. Los resultados obtenidos con la utilización de los tres modelos son preliminares, pero muestran el potencial biológico de los agentes de control.

En otros casos, Arcila (6) presenta una revisión de un conjunto de modelos para estimar la producción de los cafetales, clasificándolos en modelos biológicos y econométricos. Éstos corresponden a la clasificación de modelos empíricos o correlativos, en los que se utilizan métodos estadísticos de regresión. Entre los modelos biológicos cita los basados en los componentes de producción y variables de crecimiento, como el propuesto por Cannell (20) y los aplicados por Arcila y Chaves (8), Browning y Dorward (17), Machado (68), Salazar *et al.* (95) y Valencia (107). También cita casos de modelos basados en el manejo agronómico, como los aplicados por Arcila y Jaramillo (10), Browning y Fisher (18), Castillo (25), Kugura *et al.* (63), Mestre (72), Uribe y Mestre (106), y Vallejo (108). Entre los modelos basados en las relaciones clima-planta, cita los aplicados por Dean (28), Gómez (38), Jaramillo y Guzmán (55), Jaramillo y Valencia (57), Mestre (72), Liu y Liu (67), Muñoz (76), Pochet (86) y Suárez de Castro (103).

Igualmente, Arcila (5, 6) revisa y cita diferentes aplicaciones de modelos econométricos en la producción cafetera colombiana: CRECE (26), Jaramillo (58, 59, 60), Leibovich (64) y Zambrano (117, 118). Para Brasil y México, se relacionan las aplicaciones de Becerril y Ortega (13) y de Leite (65).

Arcila y Jaramillo (10), proponen una metodología para el pronóstico de cosecha regional con base en las diferentes herramientas disponibles en los Comités de Cafeteros, basándose en la adoptada en el Comité de Cafeteros de Chinchiná, la cual es considerada como un punto de partida importante para la normalización de una metodología regional. Se recomienda impulsar los estudios de zonificación agroecológica sobre uso de la tierra y estructura de la caficultura regional, para obtener mejores bases para el pronóstico de la cosecha y el conocimiento de la estratificación de la caficultura por edades, densidades y productividades a nivel regional. Arcila (7) también adaptó la metodología utilizada en Brasil para el pronóstico de cosecha.

Otro modelo econométrico de pronóstico de cosecha a mediano y largo plazo para el departamento de Caldas, fue descrito por Jaramillo (58), con base en una serie de ecuaciones de predicción, recomendando la introducción de variables climáticas en el modelo y el efecto de la fertilización en la productividad cafetera.

En cuanto a la bibliografía sobre los aspectos biológicos y agronómicos del crecimiento, fenología, producción, manejo y condiciones de suelo y clima, entre otros, referidos al café en Colombia, existe una excelente y extensa documentación en Cenicafé, que constituye el principal material de trabajo en la construcción, validación y aplicación de un modelo. Entre otros están los trabajos, con sus respectivas referencias, de Arcila (5), Arcila *et al.* (11), la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Conferencias Conmemorativas de los 50 años de Cenicafé (35), la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia: 40 Años de investigaciones en Cenicafé (32), y la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia: Manual del Cafetero Colombiano (31).

La División de Planeación de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (33, 34), adelantó un diagnóstico y proyecciones sobre la evolución de la producción, el ingreso de

los productores y el Fondo Nacional del Café, aplicando lo que denominó una función de producción intertemporal, que simuló la producción en el período 1970-1983.

## CAPÍTULO IV.

### Estrategia para la construcción del modelo de simulación para el cultivo del café

Para la construcción del modelo, se definieron seis subsistemas de factores determinantes del cultivo del café, que actúan en forma integral: Subsistema de factores del clima, subsistema de factores del suelo, subsistema de factores de manejo (planta y condiciones ambientales), subsistema de la planta (fisiología y ecofisiología), subsistema de plagas y enfermedades, y subsistema socio-económico. No se consideró lo relacionado con el proceso del beneficio del café.

Estos subsistemas interactúan con procesos o mecanismos de las plantas y del cultivo; por ejemplo, el proceso de fotosíntesis del cultivo en la situación de producción 1, se intercepta con los subsistemas de clima, planta y manejo, en el sentido de que intervienen en ese proceso factores de esos subsistemas.

En cada proceso y en cada subsistema se pueden presentar tres tipos de variables: Exógenas, de estado y endógenas. Las variables exógenas son las de entrada, que se predeterminan independientemente del proceso o subsistema que se considere. Las de estado, como lo indica su nombre, describen el estado del respectivo proceso y del sistema, o de uno de sus componentes (al comienzo, al final o durante un período). Las variables endógenas son las variables de salida o de respuesta del proceso o subsistema.

Entre estas variables existen relaciones funcionales que describen las interacciones entre ellas y las componentes del sistema, en su conjunto. Estas relaciones funcionales generan el comportamiento de cada proceso o subsistema y pueden ser de dos tipos:

- Identidades que corresponden a definiciones o declaraciones tautológicas.
- Características de operación que corresponden a ecuaciones matemáticas que relacionan las variables **endógenas y de estado con las exógenas**. Aplicadas a procesos estocásticos, toman la forma de funciones de densidad. Los parámetros de las características de operación se derivan sobre la base de inferencias estadísticas.

Entre los procesos y subsistemas existen relaciones según sus entradas y salidas, algunas de las cuales son de causa-efecto; también existen retroalimentaciones en el sentido que el proceso o subsistema toma como elementos de entrada porciones de sus propias salidas, en un período previo. Constituye parte del proceso investigativo, determinar las variables y su

naturaleza en cada proceso y subsistema, los tipos de relaciones entre ellas y los parámetros correspondientes.

El modelo global que representa o describe el sistema en su conjunto, tiene las siguientes características:

- **Lógico** (matemático): con diferentes tipos de variables, parámetros y relaciones funcionales.
- **Estocástico**: en su estructura existen componentes que se comportan conforme a las leyes probabilísticas.
- **Dinámico**: el factor tiempo es un elemento de vital importancia en su estructura y manejo.
- **Recursivo**: se producen secuencias de valores sucesivos de variables endógenas, para los diferentes procesos y subsistemas, de tal manera que, para cualquier período el valor de cada variable endógena se puede obtener a partir solamente de las variables exógenas, las endógenas retrasadas y las endógenas precedentes, que aparecen en la sucesión.

Además de estas características, describe el comportamiento del crecimiento y desarrollo en períodos de varios años, por tratarse de un cultivo perenne.

El planteamiento de la estructura del modelo, fue orientado por los trabajos de Aracil (3), Naylor *et al.* (77), Penning de Vries y van Laar (84) y Rabbinge *et al.* (88).

Un aspecto esencial es la consideración de que el sistema objeto de estudio, el cual se busca modelar, es dinámico, es decir, un conjunto de partes operativamente interrelacionadas, en el que unas actúan sobre las otras y del que interesa considerar fundamentalmente su comportamiento global. El conjunto de las partes tiene propiedades de interés que no pueden considerarse como la simple suma de ellas. Son estas propiedades las que justifican la consideración del sistema como unidad y no como simple suma de partes, por lo tanto, para la construcción del modelo se siguieron las siguientes etapas: análisis del sistema, formulación del modelo, evaluación del modelo, programación y validación.

Según Spitters *et al.* (99), los factores que influyen en la producción de un cultivo pueden clasificarse en tres categorías: 1. Factores que determinan los rendimientos potenciales como son la radiación solar, la temperatura y principalmente las propiedades fisiológicas y genéticas del cultivo; 2. Factores que limitan los rendimientos como el suministro o disponibilidad de agua y nutrimentos; 3. Factores que reducen los rendimientos como arvenses, plagas y enfermedades, granizadas y otros.

De acuerdo con lo anterior, dichos investigadores plantean que para estudiar los efectos de los factores que determinan y limitan los rendimientos, y sus interacciones, se siga la estrategia definida por Wit de y Penning de Vries (116), que consiste en distinguir diferentes situaciones o niveles de producción y que para estudiar los efectos de los factores que reducen los rendimientos, éstos se superpongan sobre los anteriores factores.

Sobre esta base y siguiendo este lineamiento, se definieron cinco situaciones o niveles de producción:

**Nivel de producción 1.** Corresponde a la producción potencial, que se logra en condiciones con suficientes nutrientes para las plantas y suficiente y adecuada cantidad de agua en el suelo, durante todo el período de crecimiento y desarrollo del cultivo. La tasa de crecimiento del cultivo bajo estas condiciones está determinada principalmente por la radiación solar absorbida y por la temperatura.

**Nivel de producción 2.** El crecimiento y el desarrollo del cultivo está limitado por el déficit o el exceso de agua, por lo menos en algún intervalo importante del período de desarrollo del cultivo, pero cuando se corrige esa situación la tasa de crecimiento alcanza la tasa determinada por la radiación absorbida. Se requiere que el cultivo esté fertilizado adecuadamente.

**Nivel de producción 3.** El crecimiento y el desarrollo del cultivo está limitado por el déficit de nitrógeno, por lo menos en algún intervalo de tiempo importante del período de desarrollo del cultivo, y por agua o radiación en el resto del período. En este nivel, el cultivo requiere que los minerales sean suministrados adecuadamente.

**Nivel de producción 4.** El crecimiento y el desarrollo del cultivo está también limitado por la baja disponibilidad o suministro de potasio y otros minerales, por lo menos en algún intervalo de tiempo importante del período de desarrollo del cultivo. Corresponde, por lo general, a áreas con cierto nivel de explotación donde se fertiliza deficientemente o no se fertiliza.

**Nivel de producción 5.** El crecimiento y el desarrollo del cultivo está limitado por plagas y enfermedades, las cuales pueden afectar cualquiera de los niveles anteriormente descritos.

Para cada situación de producción se identifican los procesos fundamentales o cruciales que los determinan, para luego modelarlos matemáticamente, teniendo en cuenta que:

- El modelo de producción 1 contiene los procesos fundamentales del crecimiento y desarrollo potencial del cultivo.
- El modelo de producción 2 contiene los procesos considerados en el modelo 1, más los procesos cruciales que caracterizan la situación o nivel del modelo de producción 2.
- Los modelos de producción 3 y 4 contienen los procesos de los modelos 1 y 2 más los procesos cruciales que caracterizan las situaciones o niveles de producción de los modelos 3 y 4.
- El modelo de plagas y enfermedades se conecta con cualquiera de los modelos 1, 2, 3 ó 4.

Este trabajo se ubicó y se limitó a la concepción, diseño e implementación de un modelo para el nivel de producción 1, que corresponde aproximadamente a un 40% del área del cultivo nacional, la cual representa alrededor del 65% de la producción total del país. Los otros niveles o situaciones de producción son objeto de otros proyectos de investigación independientes, que se estructuran sobre la base de los resultados de este proyecto conforme a lo presentado.

## CAPÍTULO V.

# Desarrollo del modelo de simulación para la producción potencial: Nivel de producción 1

A continuación se describen cada una de las etapas seguidas en la construcción del modelo de simulación para el nivel de producción 1.

### Primera Etapa: Análisis del Sistema

En esta etapa, se siguieron los siguientes pasos:

- Delimitación del sistema e identificación y definición de subsistemas y procesos o mecanismos. Los límites del sistema se escogieron incluyendo en su interior, aquellos componentes necesarios para generar los modos de comportamientos de interés.
- Definición y clasificación de las variables del subsistema y del proceso. La clasificación se hizo como endógena, exógena y de estado.
- Definición del modo de referencia. Consistió en el trazado de gráficos que representan el comportamiento temporal de las principales variables de respuesta.
- Elaboración del diagrama de relaciones causales o de influencia. Se identificaron las relaciones que ligan a dos variables entre sí, las cuales son de dos tipos: causal, propiamente dicha, que es aquella en que una variable determina a otra con una relación de causa-efecto, y correlativa, que es aquella en la que no existe una relación de causa-efecto.
- Determinación y clasificación de bucles de retroalimentación, en estructuras en las que se dan cadenas cerradas de relaciones causales.

### Segunda Etapa: Formulación del Modelo

El procedimiento para la formulación del modelo fue el siguiente:

- Evaluación de la información disponible y evaluación preliminar de los datos adicionales que serían necesarios recolectar.
- Planteamiento y discusión de alternativas de modelos.
- Construcción del diagrama de Forrester, con base en la clasificación de las variables del diagrama de relaciones causales, en variables de nivel de flujo o auxiliares.

- Establecimiento de las ecuaciones matemáticas con base en submodelos.
- Definición y formulación detallada del modelo definitivo y elaboración del diagrama lógico correspondiente.
- Definición detallada de la información requerida y el diseño, la ejecución y el análisis de los experimentos necesarios para completar dicha información.
- Recolección y procesamiento de datos.
- Estimación y evaluación de parámetros y ajuste de submodelos.

Como resultado de la ejecución de esta segunda etapa, se construyó una estructura para el nivel 1, compuesta a su vez, de cinco submodelos (Figura 1), cada uno de ellos, con sus variables exógenas, de estado y endógenas.

A continuación se ilustra el desarrollo de cada uno de los submodelos.

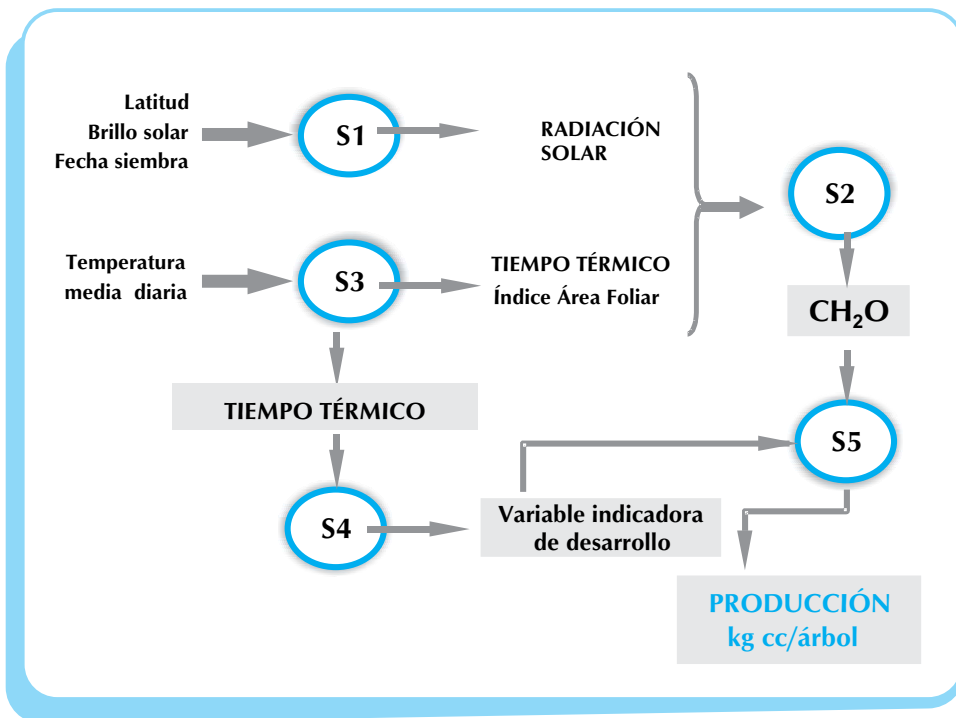
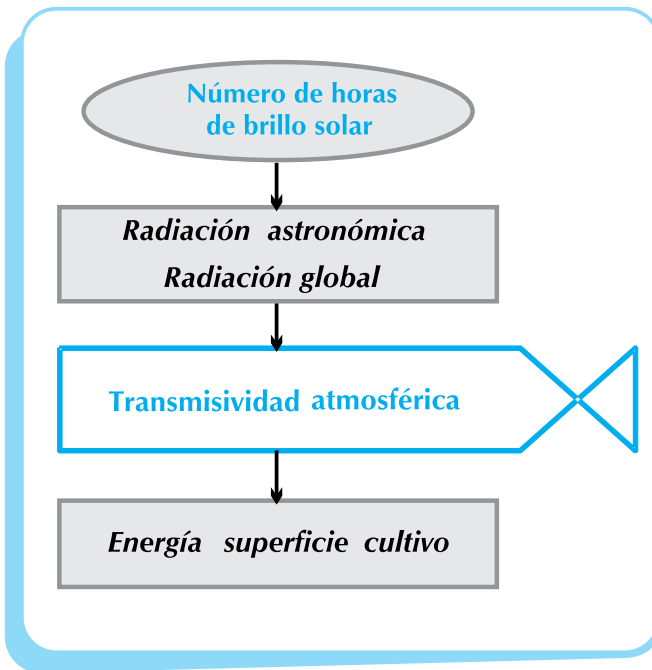


Figura 1. Diagrama modular de la estructura del nivel 1 ó producción potencial.



## Submodelo 1 (S1): Dinámica de la radiación solar

Este submodelo tiene como variables exógenas la latitud, el día del año y el número de horas de brillo solar diario (Figura 1); como variables de estado se tienen la radiación astronómica y la radiación global; como proceso la transmisividad; y como variable endógena, la energía en la superficie del cultivo (Figura 2).



La cantidad de radiación solar incidente en una región está determinada por factores astronómicos, geográficos y topográficos. Otros factores que influyen son la transparencia atmosférica y el brillo solar, los cuales a su vez, están determinados por la circulación general de la atmósfera, la topografía del terreno, el contenido de vapor de agua en el ambiente, la elevación del sol y la longitud del día (29).

Figura 2. Diagrama de Forrester para la dinámica de la radiación solar (Submodelo 1).

La radiación solar es el principal factor que determina el microclima del cultivo; su energía condiciona la temperatura del aire y del suelo, el movimiento del viento, la evapotranspiración y la fotosíntesis, de tal manera que la intensidad de la radiación, el grado de interceptación y la eficiencia en el uso de la energía radiante, son factores determinantes en la tasa de crecimiento de las plantas.

La cantidad de energía radiante recibida en la distancia media entre el sol y la tierra se denomina *constante solar*, con un valor de  $1.370 \text{ wátios.m}^{-2}$  ( $1,96 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ ). La atmósfera absorbe y dispersa selectivamente la radiación solar, modificando el flujo y la calidad del espectro que incide en la superficie terrestre. La magnitud de ese fenómeno depende de la masa relativa de la atmósfera (15).

La radiación solar se modifica a través de la atmósfera, dispersando los rayos directos, debido a la absorción del ultravioleta y el azul por el ozono, a la faja visible que es absorbida por el oxígeno y el infrarrojo que es absorbido por el dióxido de carbono, al vapor de agua y otros gases y además, por pequeñas moléculas y el polvo presente en la atmósfera.

La radiación diaria en la parte superior de la atmósfera o **radiación global diaria astronómicamente posible** (Joule m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>), está dada por la siguiente expresión:

$$S_{0,d} = \int S_0 dt = \int K \cdot \text{sen}\beta dt = K \cdot 2 \int \text{sen}\beta dt = K \cdot F$$

Donde:

$$F = 3.600 [ Ld \cdot S + 24 \cdot C + \sqrt{1-(S/C)^2} ]$$

Ld : Longitud del día solar en horas

$$Ld = 12 + (24/180)\text{arcsen}(\tan L - \tan E)$$

$$S = \text{sen}(L) \cdot \text{sen}(E)$$

$$C = \cos(L) \cdot \cos(E) \cdot \cos\{2\pi \cdot (t + 12)/24\}$$

E : Declinación solar

L : Latitud

$$E = \text{arcsen}\{\text{sen}(23,5)\cos[2\pi(D+19)/365]\}$$

D: Número del día del año a partir del primero de enero

La radiación dispersada, a su vez es dispersada de nuevo a otras regiones de la atmósfera antes de salir de ella o alcanzar la superficie terrestre, proceso conocido como radiación difusa. La radiación que no presenta modificaciones al pasar por la atmósfera, por efecto de sus componentes, se denomina radiación directa. La suma de las cantidades de radiación directa y radiación difusa se denomina radiación global. Esta radiación es de onda corta, con rangos espectrales comprendidos entre los 300 y 3.000 nm (14) y su estimación se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$S_g = K \cdot \text{sen}\beta \cdot (1 + c \text{sen}\beta) \cdot (S_{g,d}/S_{0,d})$$

Donde:

$$\text{sen}\beta = \text{sen}L \cdot \text{sen}E + \cos L \cdot \cos E \cdot \cos [2\pi \cdot (t+12) / 24]$$

L : Latitud del lugar en grados, definida como la distancia angular de un sitio a partir del plano ecuatorial.

E : Ángulo de declinación solar, en grados, definido como el ángulo formado por la intersección del plano de la órbita terrestre y el plano ecuatorial. Este valor varía en el transcurso del año entre +23,5° (Norte, el 21 de junio) y -23,5°C (Sur el 21 de diciembre) y se estima como  $-\text{arsen}\{\text{sen}(23,5) \cdot \cos[2\pi \cdot (D+10)/365]\}$ , donde D es el número del día del año a partir del primero de enero.

t : Hora del día.

El **proceso de transmisividad**, para determinar la cantidad de radiación global diaria o radiación incidente en un sitio, se da por medio de la relación lineal de Angstrom, es decir:

$$\frac{S_{g,d}}{S_{0,d}} = a + b \frac{NHBS}{NHBSE} = A$$

$S_{g,d}$  : Radiación global diaria observada en la superficie terrestre

$S_{0,d}$  : Radiación global diaria astronómicamente posible

NHBS : Brillo solar observado, en horas

NHBSE : Brillo solar diario astronómicamente posible, en horas

A : Transmisividad atmosférica

a y b : Coeficientes de regresión

Para Cenicafé, Gómez y Guzmán (39), cuantificaron la relación lineal de Angstrom, con la estimación de los parámetros de regresión en  $a= 0,26$  y  $b= 0,51$ , con un coeficiente de determinación de  $0,88$ . Esta expresión permite estimar la radiación global diaria en el modelo de producción potencial.

La radiación global diaria o la **energía diaria que llega a la superficie del cultivo**, puede ser obtenida a partir de la latitud del lugar, el número de horas de brillo solar y el número del día del año, como se describe a continuación:

$$S_{g,d} = \int K \text{ sen } \beta (1 + c \text{ sen } \beta) dt$$

Donde:  $S_{g,d} = \frac{\text{sen } \beta (1 + c \text{ sen } \beta)}{Z}$

$$Z = \int \text{sen } \beta (1 + c \text{ sen } \beta) dt$$

$$c = \frac{b}{a} \Rightarrow \frac{S_g}{S_0} = a + b \text{ sen } \beta$$

$\text{sen } \beta =$  Ángulo elevación del sol

$$\text{sen } \beta = \text{sen}(L) \text{ sen}(E) \cos(L) \cos(E) \cos\left[\frac{2\pi(t+12)}{24}\right]$$

L = Latitud

E = Declinación solar

t = Hora del día

Para la estimación de la radiación global diaria, se utiliza como método preciso y rápido, el método de integración de Gauss (43, 100).

Spitters *et al.* (101), aplicaron la metodología utilizada por DeJong, para obtener la radiación directa y difusa a partir de los valores de transmisividad de la radiación solar en las condiciones de Holanda. Aragón *et al.* (4), con la información de radiación difusa registrada de la estación climática del IDEAM en El Dorado (Bogotá, Colombia), estimaron la proporción de radiación difusa de acuerdo con la transmisividad atmosférica (Tabla 1).

Como se observa en la Tabla 1, la proporción de la radiación difusa puede presentar relaciones de tipo lineal o cuadrático, dependiendo del rango de transmisividad atmosférica que se presente en el día. Los valores encontrados por Aragón *et al.* (4), están muy próximos a los reportados por Spitters *et al.* (101), para las condiciones de Holanda, a 52° de latitud Norte.

Según Spitters *et al.* (101), la radiación global difusa instantánea ( $S_{df}$ ) se obtiene de la siguiente manera:

$$S_{df} = D S_g = D S_{g,d} \frac{\text{Sen } \beta}{F}$$

Donde:

$$F = 3.600 * [ Ld * S + 24 * C + \sqrt{1-(S/C)^2} ]$$

La radiación solar directa se obtiene por la diferencia entre la radiación global y la radiación difusa, es decir:

$$S_{dir} = S_g - S_{df}$$

**Tabla 1.** Proporción de radiación difusa (D), de acuerdo con la transmisividad atmosférica (A), para las condiciones de El Dorado (Bogotá, Colombia). 1994 (4).

Proporción de radiación difusa (D)	Transmisividad atmosférica $A = S_{g,d} / S_{0,d}$
D = 1,0	$A \leq 0,037$
$D = 1,0 - 2,43 (A - 0,04)^2$	$0,04 \leq A < 0,34$
$D = 1,29 - 1,50 A$	$0,34 \leq A < 0,77$
D = 0,13	$0,77 \leq A$

## Submodelo 2 (S2): Interceptación de la radiación solar y fotosíntesis

Para el proceso de la fotosíntesis la planta usa un rango espectral de la radiación solar comprendido entre los 400 y los 700 nm, denominada comúnmente radiación fotosintéticamente activa (RFA), la cual es aproximadamente el 50% de la radiación global (93), es decir, RFA = 0,5 Sg.

La estimación de la fotosíntesis del follaje, a partir de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (RFA), constituye la parte fundamental de la mayoría de los modelos de simulación de cultivos, la cual se sustenta en el conocimiento de la RFA dentro del follaje y de la respuesta en fotosíntesis, a la radiación en hojas individuales.

Los estudios de interceptación de la radiación por la planta han sido adelantados mediante modelos, dada la multiplicidad de factores involucrados. Según Ross (93), éstos incluyen la cantidad del follaje, dimensiones y orientación del dosel, distribución del área foliar, ángulos foliares y radiación solar global, incluyendo la componente directa y difusa.

La expresión para describir la interceptación de la radiación solar en la planta fue propuesta por Monsi y Saeki, citados por Saeki (94). La absorción de la RFA a la profundidad L del dosel, medida en términos de Índice de Área Foliar (IAF) desde la parte superior de la planta, se expresa mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$I_a = - dl/dL = (1,0 - r) I_o K e^{-k \cdot L} \text{ ( Joule. m}^2 \cdot \text{hojas}^{-1} \text{ )}$$

Donde:

$I_a$  : Radiación fotosintéticamente activa dentro de la planta hasta un índice de área foliar acumulado, desde la parte superior de la planta.

$dl/dL$ : Flujo de la radiación fotosintéticamente activa por unidad de área foliar.

$r$  : Coeficiente de reflexión del cultivo (albedo).

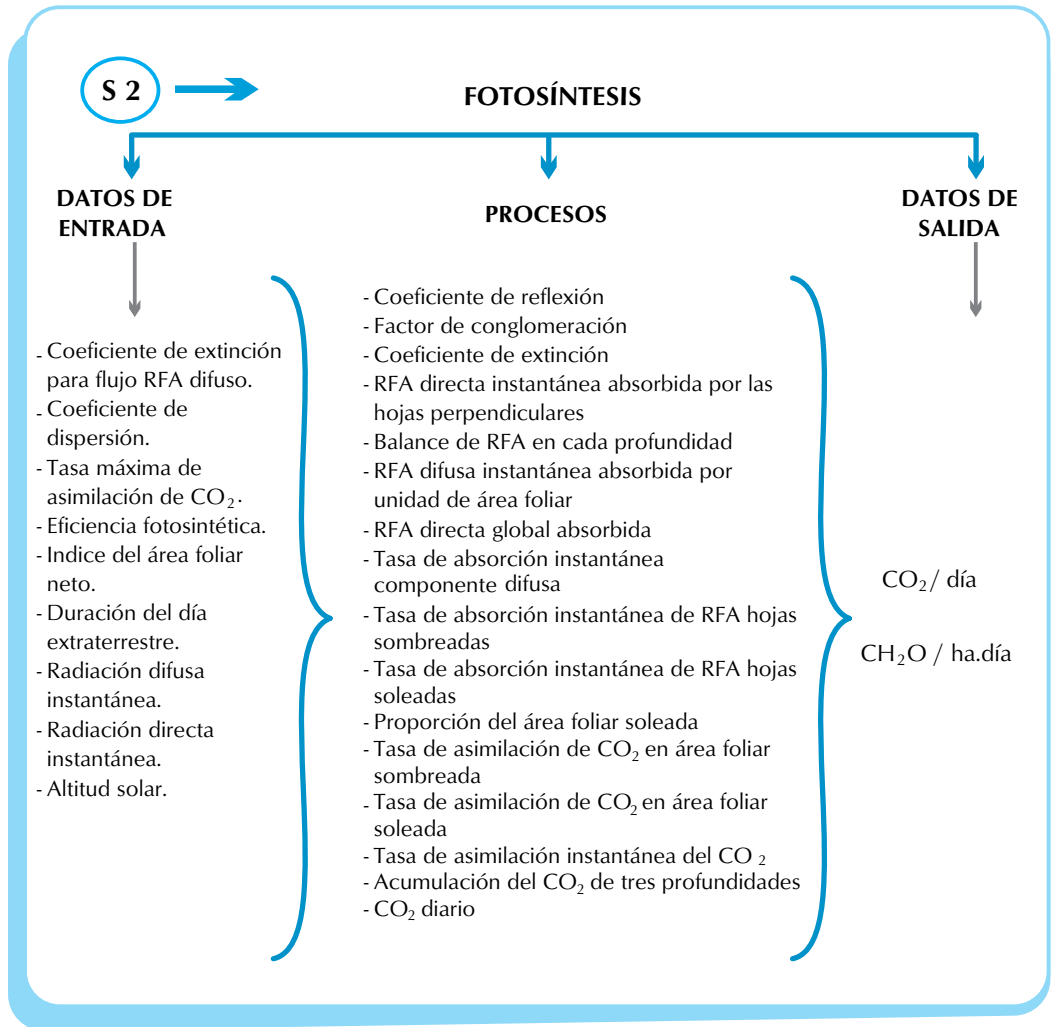
$I_o$  : Radiación fotosintéticamente activa incidente en la parte superior del cultivo ( $J \text{ m}^{-2} \cdot \text{suelo} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

$L$  : Índice de área foliar ( $\text{m}^2 \text{ hojas} / \text{m}^2 \text{ suelo}$ ).

$K$  : Coeficiente de extinción o tasa de absorción de la radiación solar por la planta.

El modelo para simular la absorción de la radiación fotosintéticamente activa y la asimilación del dióxido de carbono por el café, tiene los datos de entrada, procesos y salidas descritos en la Figura 3.

Para *Coffea arabica* L. variedad Colombia, Castillo *et al.* (23, 24) determinaron los coeficientes de extinción ( $k$ ), para la radiación fotosintéticamente activa (RFA), en densidades de siembra entre 2.500 y 12.500 plantas/ha, de tal manera que los coeficientes de extinción para la radiación directa varían entre 0,51 y 0,72, y para la radiación difusa están entre 0,41 y 0,60.



**Figura 3.** Datos de entrada, procesos y datos de salida del submodelo fotosíntesis (submodelo 2).

Cuando las hojas son iluminadas, la fotosíntesis se realiza a una tasa que depende de la distribución de los fotones sobre las hojas y de la eficiencia fotosintética de cada hoja (54, 66).

Las tasas de absorción de la radiación solar por la planta no solamente dependen de las propiedades ópticas y de la eficiencia fotosintética de la hoja, sino también de su inclinación y orientación espacial.



La distribución de los ángulos foliares es definida por Norman y Campbell (78), como la distribución de los ángulos de inclinación (ángulo entre la perpendicular de la superficie de la hoja y la vertical a un plano horizontal de referencia) y sus ángulos de azimut, ángulo formado entre una proyección horizontal a la hoja y la dirección Sur.

La orientación de la hoja es un aspecto estructural importante. En primer lugar, la irradiancia foliar está notoriamente influenciada, por depender del ángulo entre la normal de la hoja y la dirección del rayo directo; segundo, este ángulo determina el área proyectada por los elementos del follaje en un plano horizontal, por ejemplo, la capacidad de interceptación (98).

Según Goudriaan (41, 42, 44), Goudriaan y Monteith (45), y Goudriaan y Van Laar (46), la disposición de las hojas en la planta se caracteriza mediante la frecuencia acumulada de los ángulos foliares. Wit de (113), establece cuatro clases de distribución foliar en el dosel, de acuerdo con la inclinación foliar, así:

- Distribución planófila, en la cual el arreglo foliar de las hojas es en su mayoría horizontal, es decir, con ángulos menores de 30°.
- Distribución erectófila, en la cual el arreglo es predominantemente vertical con la mayoría de los ángulos superiores a los 60°.
- Distribución plagiófila, en la que en el arreglo foliar predominan ángulos entre los 30° y los 60°.
- Distribución extremófila, en la cual se presenta un doble pico de ángulos de inclinación foliar con máximos en cero y 90°.

Las medidas realizadas por Castillo *et al.* (23, 24), en *Coffea arabica* L. variedad Colombia, mostraron que **la planta de café presenta una distribución foliar planófila.**

Al estudiar la interacción de la radiación solar con el dosel, se distinguen dos clases de área foliar: área foliar sombreada y área foliar iluminada.

El área foliar sombreada absorbe la RFA difusa incidente y la proporción de RFA difusa de la componente directa total. El área foliar iluminada absorbe la RFA difusa y directa.

Con los planteamientos anteriores se construyó un submodelo independiente, para conocer el balance de RFA por el dosel y por lo tanto, la interceptación y la transmisión, de tal manera que para un instante del día, se integra con relación al índice de área foliar (IAF), de tres profundidades y se obtiene la absorción de la RFA discriminada en directa y difusa, a través del dosel. Dicho procedimiento se repite para tres instantes del día y posteriormente se integran a nivel diario, para obtener la absorción diaria de la RFA de la planta mediante la integración Gaussiana (40).

La ecuación diferencial asociada a la relación fotosíntesis y radiación está dada por la siguiente ecuación de flujo:

$$\frac{dA}{dI_a} \Rightarrow A_j = A_m \left[ 1 - e^{-\varepsilon \left( \frac{I_a}{A_m} \right)} \right] \quad \text{Fotosíntesis bruta}$$

Donde:

$A_j$  : Tasa de asimilación de dióxido de carbono ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )

$A_m$ : Asíntota o tasa de asimilación de saturación de luz, para hojas individuales

$\varepsilon$  : Pendiente inicial o eficiencia de la utilización de la radiación de hojas individuales

$I_a$  : Radiación absorbida por unidad de área foliar

$j$  : Área foliar iluminada o área foliar sombreada

Esta ecuación se aplica para hojas iluminadas y para hojas sombreadas, sustituyendo  $A_m$  por  $A_s$  o  $A_j$ ; en donde,  $A_s$  es la tasa de asimilación del  $\text{CO}_2$  del área foliar sombreada, y  $A_i$  es la tasa de asimilación del  $\text{CO}_2$  del área foliar iluminada y en este caso se utiliza  $I_{i,a}$ .

La asimilación instantánea del dosel se obtiene como un promedio de la asimilación, en tres estratos de la planta, los cuales según Goudriaan (43) se seleccionan mediante la integración de Gauss.

Una vez la planta procesa los asimilados brutos, hay un consumo de energía por respiración utilizada para su crecimiento y su mantenimiento (71).

La importancia de la respiración, para el balance de carbono de la planta, es manifiesta al considerar que aproximadamente la mitad del carbono fijado en la fotosíntesis se pierde eventualmente como  $\text{CO}_2$  durante el proceso respiratorio (1, 2).

**La respiración de crecimiento**, incluye el carbono o la energía necesarios para producir una ganancia neta en peso seco. Estos costos abarcan el carbono incorporado actualmente a la nueva biomasa, así como los carbohidratos metabolizados para producir poder reductor (NADH, NADPH, FADH) y ATP para los procesos biosintéticos y de transporte, toma y reducción de nutrientes. Este costo se considera proporcional a la tasa de crecimiento o tasa de fotosíntesis bruta.

**La respiración de mantenimiento**, representa los consumos de carbono y energía necesarios: 1) Para mantener y reparar el sistema estructural existente mediante la síntesis de sustancias, que deben renovarse en los procesos de metabolismo, por ejemplo, proteínas enzimáticas, ácido ribonucleico, lípidos de la membrana; 2) Para el mantenimiento de los gradientes iónicos y de metabolitos entre células; y 3) Para la adaptación a condiciones ambientales cambiantes o al

estrés. Estos costos no conducen a una ganancia en peso seco y se consideran proporcionales al peso seco de la planta o tejido existente. Tanto los costos de crecimiento como los de mantenimiento se reportan en términos de gramos de CO<sub>2</sub> o de glucosa.

Aunque la respiración de crecimiento y la respiración de mantenimiento son procesos que ocurren a diferentes tasas y tienen mecanismos propios de regulación, presentan como característica común la producción de CO<sub>2</sub>. De allí que la cuantificación de la tasa de producción de CO<sub>2</sub> sea un componente importante en la caracterización de estos dos procesos; por lo tanto, para la determinación de la respiración de crecimiento y el mantenimiento en café, se partió del siguiente modelo general de respiración (2):

$$R = gF_b + mW$$

Donde:

R : Respiración de crecimiento y mantenimiento

F<sub>b</sub>: Fotosíntesis bruta

g : Coeficiente de respiración de crecimiento

m: Coeficiente de respiración de mantenimiento

W: Cantidad de carbono de la biomasa

Todo el proceso de crecimiento se puede caracterizar mediante dos parámetros: El requerimiento de glucosa (RG) y el factor de producción de CO<sub>2</sub> (FC). Se asume que estos parámetros son similares para las hojas, los tallos y las raíces (47).

Si se conoce la proporción de los principales componentes (carbohidratos, proteínas, lípidos, ligninas, ácidos orgánicos, minerales) en los diferentes tejidos u órganos, es posible, mediante el análisis de las rutas bioquímicas para su síntesis, determinar los costos de su construcción RG y FC (69, 71, 85).

El CO<sub>2</sub> desprendido durante la biosíntesis de la biomasa de la planta de café tiene un valor promedio de 0,671 de CO<sub>2</sub> por gramo de materia seca, el cual corresponde al costo de la respiración de crecimiento.

En la Tabla 2, se plantean para cada órgano de la planta de café, las funciones para describir la respiración.

La diferencia entre la producción de CO<sub>2</sub> y el costo de respiración, da el proceso de asimilados netos (CH<sub>2</sub>O/ha.día), con los cuales se pasa a la distribución de los pesos secos.

### **Submodelo 3 (S3). Crecimiento y mortalidad foliar**

El potencial de producción de la planta está determinado por la superficie foliar disponible para la asimilación del carbono, a través de su ciclo de vida. La cosecha obtenida es el resultado

**Tabla 2.** Función de respiración para cada órgano de la planta de café<sup>1</sup>

Órgano	Función: $R = g F_b + mW$
Raíz	$R_z = 0,339 F_b + 0,010W$
Tallo	$R_T = 0,565 F_b + 0,015W$
Rama	$R_R = 0,560 F_b + 0,015W$
Hojas <sub>l</sub>	$R_{Hl} = 0,480 F_b + 0,040W$
Hojas <sub>m</sub>	$R_{Hm} = 0,506 F_b + 0,040W$
Hojas <sub>e</sub>	$R_{He} = 0,567 F_b + 0,040W$
Fruto tipo 1	$R_{F1} = 0,493 F_b + 0,030W$
Fruto tipo 2	$R_{F2} = 0,598 F_b + 0,030W$
Fruto tipo 3	$R_{F3} = 0,554 F_b + 0,030W$
Fruto tipo 4	$R_{F4} = 0,504 F_b + 0,015W$

del tamaño, la eficiencia y la duración de esta superficie fotosintética y de la redistribución de los fotosintetizados (47, 54).

Son pocos los estudios sobre el desarrollo foliar del cafeto. En plantas jóvenes, los aspectos considerados comprenden seguimiento de la tasa de crecimiento de hojas individuales, de la tasa de aparición de hojas en ramas individuales o del crecimiento del área foliar. El desarrollo foliar de plantas adultas ha sido el menos estudiado, especialmente en relación con la edad de la planta, ya que en la mayoría de los casos, éste sólo se ha considerado puntualmente o para períodos de tiempo muy cortos (9, 19, 22, 23, 73, 74, 80, 109, 110).

El índice de área foliar (IAF) ha sido tomado como un indicador del desarrollo del cultivo, de uso del agua y de la productividad. Es una medida que se deriva del conocimiento del desarrollo foliar, y se define como el área de la superficie fotosintética que cubre un área dada de terreno, determinada generalmente por la distancia de siembra. La producción de materia seca aumenta con el IAF, hasta un óptimo, por encima del cual se produce sombra entre las hojas, con reducción de la tasa fotosintética y de la tasa de asimilación neta (47).

En Colombia, Valencia (107) estudió el desarrollo foliar en *Coffea arabica* L. Variedad Caturra, en tres densidades de siembra, durante cuatro años, en intervalos semestrales, y encontró que el desarrollo foliar era mayor en las menores densidades de siembra y viceversa. Además, sugiere que el IAF óptimo para *C. arabica* variedad Caturra es de ocho, y que éste se puede alcanzar a los tres años después de la siembra, con 10.000 plantas por hectárea, o a los cuatro años con 5.000 plantas por hectárea. Otros estudios realizados por Arcila y Chaves (9), sugieren que el cafeto puede alcanzar valores máximos de IAF cercanos a diez.

La dinámica foliar está controlada por factores genotípicos y ambientales (12, 27, 47, 50, 79); sin embargo, en las condiciones colombianas y en el caso del café, predomina un genotipo

<sup>1</sup>Arcila, 1996. Respiración del café. Documento interno, Cenicafé.

específico y puede decirse que el desarrollo foliar está influenciado, principalmente, por las condiciones ambientales.

Con respecto a la dinámica de la mortalidad foliar, en café se conocen muy pocos estudios. Algunos datos obtenidos en Cenicafé (9), muestran una amplia variación en cuanto a la duración de las hojas, así: cafetales al sol entre 132 y 571 días (promedio 354 días) y en cafetales a la sombra, entre 176 y 522 días (promedio 385 días), con una mayor frecuencia de caída de las hojas entre los 10 y 12 meses de edad. La defoliación se presenta principalmente en los meses de mayor cosecha.

El área de hojas verdes es el principal y mayor determinante de la absorción de la luz y de la fotosíntesis del cultivo. Bajo condiciones óptimas, la intensidad de la luz y la temperatura son los factores medioambientales que más influyen en la tasa de expansión foliar. La intensidad de la luz determina la tasa de fotosíntesis y, por lo tanto, el suministro de asimilados para las hojas. La temperatura afecta las tasas de la división y expansión celular.

Existen pocos estudios sobre modelación del crecimiento del cafeto o de su desarrollo foliar (80, 102). Arcila y Chaves (9), proponen un modelo logístico para describir el desarrollo foliar del cafeto, de acuerdo con la densidad de siembra, la edad y el tiempo térmico.

Según el modelo logístico, se pueden distinguir tres fases del desarrollo foliar: Una primera fase exponencial, una siguiente fase de crecimiento intenso o fase lineal y una fase de maduración y senescencia (27, 47).

Durante la primera fase, o sea la exponencial, la mayor parte del espacio alrededor de la planta todavía no ha sido ocupado. Cada hoja nueva formada contribuye más a la interceptación de luz, de forma que el incremento del crecimiento es cada vez mayor. En esta etapa todavía no hay sombra entre las hojas y la contribución de las hojas nuevas es idéntica a la de las hojas ya existentes. El desarrollo del cultivo es principalmente vegetativo durante esta fase exponencial.

A medida que avanza el desarrollo del cultivo, comienza la sombra entre las hojas, y por encima de un IAF de tres ( $3 \text{ m}^2$  de hoja /  $1 \text{ m}^2$  de terreno), los incrementos de área foliar nueva no repercuten en incrementos en la interceptación de luz. En este momento la fase exponencial de crecimiento ha pasado a la fase de crecimiento lineal. Cuando el agua y el nitrógeno son óptimos, el IAF puede fácilmente exceder un valor de seis, pero éste no contribuye a la formación de más biomasa. Durante esta fase ocurre la mayor formación de materia seca.

La fase final del crecimiento o inicio de la de senescencia, comienza cuando la interceptación de luz disminuye de nuevo y el IAF está por debajo de tres. La disminución del IAF por ejemplo, por debajo de seis, significa que ha comenzado el proceso de translocación de nutrimentos del aparato foliar a los órganos de almacenamiento (frutos, tallos). Para la acumulación de materia seca, no importa que las hojas senescentes permanezcan en la planta o que éstas se caigan. Lo que importa para la acumulación de materia seca es el IAF de la hoja verde.

La expresión para describir IAF del cafeto en función del tiempo térmico, utilizando el modelo logístico (9, 27, 50), es la siguiente:

$$Y_t = \frac{K}{1 + C e^{-At}} + e_t$$

Donde:

$Y_t$ : Índice de área foliar en el tiempo térmico dado

$K$ : Máximo desarrollo foliar

$C$ : Constante de integración

$A$ : Promedio de la tasa de crecimiento

$e_t$ : Error aleatorio en el tiempo  $t$

$t$ : Tiempo térmico-

La información utilizada para estimar los parámetros de esta expresión se obtuvo de los estudios de Arcila y Chaves (9), en *Coffea arabica* L. variedad Colombia, y estudios de Valencia (107), en *C. arabica* L. variedad Caturra. Estas investigaciones consideraron diferentes densidades de siembra y edades del cultivo y se realizaron sin limitaciones de suministro de agua y nutrientes. Para el tiempo térmico se consideraron los registros de temperatura de la estación climática ubicada a 100 m del sitio experimental.

Las estimaciones del IAF neto, para variedad Colombia, son válidas a partir de las 1.400 unidades térmicas, lo cual equivale aproximadamente a cuatro meses de crecimiento de la planta en la localidad donde se realizó el estudio. La unidad térmica a su vez, es la diferencia entre la temperatura media diaria (°C) y la temperatura base (mínimo de temperatura donde no crece la planta), la cual se ha establecido en 10°C, para café (55).

Con los resultados de estos estudios, se construyó un modelo para simular el crecimiento del follaje a través del IAF, considerando dos etapas del cultivo: Etapa vegetativa y etapa reproductiva, para densidades comprendidas entre 2.500 y 10.000 plantas por hectárea, en *C. arabica* L. variedades Caturra y Colombia.

La etapa vegetativa está considerada desde la siembra hasta la primera floración, teniendo presente que la primera floración ocurre cuando al menos el 50% de las plantas del cultivo florecen. La etapa vegetativa finaliza o se da inicio a la etapa reproductiva, cuando se hayan acumulado aproximadamente 3.250 unidades térmicas, como mínimo, lo cual equivale aproximadamente a nueve meses, en las condiciones climáticas de Chinchiná (Caldas).

Una de las variables exógenas de este submodelo es la temperatura media diaria, para obtener el IAF en función del tiempo térmico.

El índice de mortalidad foliar o índice de área foliar muerto (IAFM) en la etapa reproductiva se propone estimarlo diariamente, aplicando un factor de corrección del 2% al IAF neto. La mortalidad foliar en la etapa vegetativa es mínima y, por lo tanto, no es considerada en esta etapa.



Con el fin de involucrar el efecto de la densidad de siembra en la simulación del desarrollo foliar y como se tiene una expresión de IAF en función del tiempo térmico, para cada una de las densidades estudiadas, se procedió a relacionar cada una de las estimaciones de los coeficientes del modelo logístico (A, C y K) con las densidades, y se obtuvieron las siguientes expresiones, tanto para la variedad Caturra como para la variedad Colombia:

#### **Variedad Caturra:**

$$A = \text{EXP}[-29,317397 + 0,942718 \cdot (\text{Log}(\text{DENSI})^2) - 0,076204 \cdot (\text{Log}(\text{DENSI}))^3]$$

$$C = 279,5832092 - 29,82546289 \text{ Log}(\text{DENSI})$$

$$K = - 38,967557 + 5,604565 \text{ Log}(\text{DENSI})$$

#### **Variedad Colombia:**

$$A = \text{EXP}[-8,620657 + 0,120319 \cdot \text{Log}(\text{DENSI})]$$

$$C = \text{EXP}[6,348890 - 0,211083 \cdot \text{Log}(\text{DENSI})]$$

$$K = - 20,008862 + 3,403012 \cdot \text{Log}(\text{DENSI})$$

Por lo tanto, para simular el comportamiento del IAF neto, se define la variedad con la cual se va a trabajar, luego, según la variedad, se aplica la densidad en cada una de las expresiones anotadas anteriormente, para obtener la estimación de cada uno de los coeficientes de la expresión logística, con la cual se obtiene la estimación del IAF, en función del tiempo térmico (Tabla 3).

En la Figura 4 se ilustran los componentes de este submodelo, en cuanto a sus entradas, procesos y salidas.

### **Submodelo 4 (S4): Desarrollo fenológico**

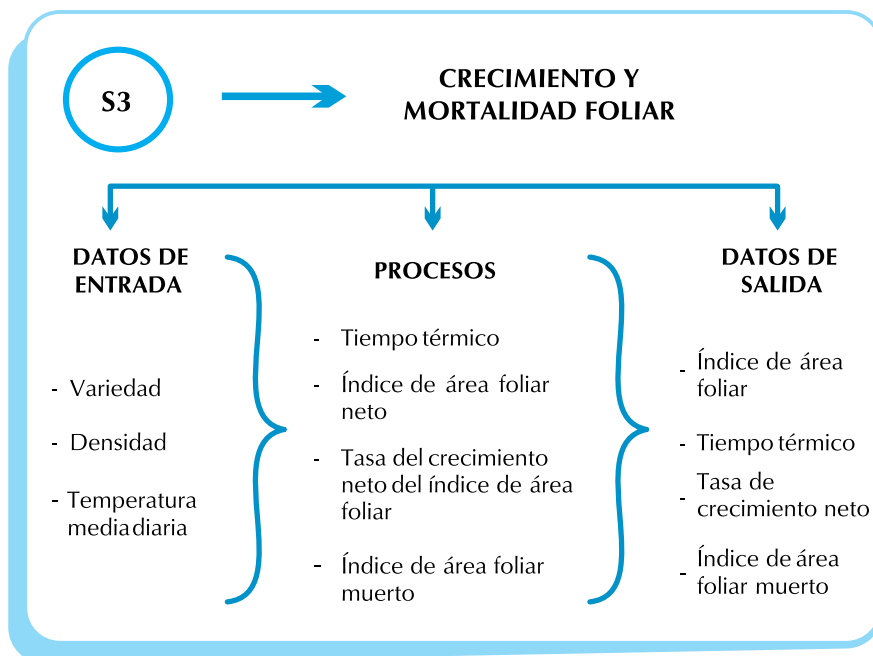
Con el submodelo de desarrollo fenológico se obtiene como variable endógena la variable indicadora del Desarrollo del cultivo (D), en función del tiempo térmico, considerando tanto la fase vegetativa como la reproductiva (47).

Se definieron **las fases vegetativa y reproductiva y su duración**, de acuerdo con el calendario fenológico presentado por Arcila (8), para *Coffea arabica* L., en las condiciones de Chinchiná (Caldas), en un ciclo de cinco años. Debe entenderse que las fechas y duración de las fases no son eventos determinísticos, ellos tienen niveles de variación que deben definirse experimentalmente. Inicialmente, para la construcción de este submodelo, se consideró que las fechas y la duración del calendario utilizado corresponden a valores promedios y que se da la simultaneidad de la floración de una cosecha con el llenado de frutos de la otra cosecha y el crecimiento rápido de los frutos de una cosecha con el llenado de frutos de otra cosecha y viceversa.

**Tabla 3.** Estimación de los parámetros de la función logística para el índice de área foliar en función del tiempo térmico, en tres densidades. *C. arabica* L. var. Colombia.

Variable	Densidad	Parámetros estimados		Intervalos de confianza 95%		R <sup>2</sup>
				Límite inferior	Límite superior	
Índice área foliar	2.500	K	5,846200	5,5497000	6,1428000	0,9957
		C	232,563400	-6,0254700	471,1522000	
		A	0,0005858	0,0004689	0,0007027	
	5.000	K	9,8021000	9,4776000	10,1265000	0,9985
		C	66,2747000	37,6958000	94,8535000	
		A	0,0004734	0,0004198	0,0005270	
	10.000	K	9,0829000	8,3977000	9,7683000	0,9911
		C	26,5726000	2,2784000	50,8667000	
		A	0,0004633	0,0003240	0,0006024	

A = Máximo desarrollo foliar o asíntota, K = Constante de integración; C = Tasa de crecimiento.



**Figura 4.** Datos de entrada, procesos y datos de salida del submodelo crecimiento mortalidad foliar (Submodelo 3).

La variable indicadora de desarrollo se construyó teniendo en cuenta el tiempo térmico (TT), el cual es sinónimo de unidades de calor, unidades térmicas o grados-día de crecimiento, y se refiere a la acumulación diaria de energía (47), así:

$$TT = \sum_{i=1}^n (T_m - T_b)$$

Donde:

- $(T_m - T_b)$  : Unidad Térmica (UT)
- $T_m$  : Temperatura media diaria
- $T_b$  : Temperatura base (mínimo de temperatura donde no crece la planta; 10 °C para café).
- n : Número de días

Jaramillo y Guzmán (35), establecieron los siguientes valores cardinales de la temperatura para el crecimiento del cafeto, los cuales son utilizados en este submodelo:

Temperatura base inferior, donde el crecimiento es nulo: 10 a 12°C.

Temperatura para máximo crecimiento: 20 a 22°C.

Temperatura base superior, donde el crecimiento es nulo: 30 a 32°C.

A su vez, la tasa de desarrollo ( $Dr$ ), se define como el inverso del tiempo (en días) requerido para completar una fase que se considera como una unidad de desarrollo fenológico. La literatura científica reporta que la tasa de desarrollo se relaciona linealmente con la temperatura media, dentro de un amplio rango de ésta (47), es decir, se debe emplear la fórmula:

$$Dr = A + BX_i + e_i$$

Donde:

$Dr$ : Tasa de desarrollo

$X_i$ :  $\bar{T}_i - T_b$

$\bar{T}_i$ : Temperatura media del día

$T_b$ : Temperatura base inferior por debajo de la cual la tasa de desarrollo es cero (0)

$e_i$ : Error aleatorio

Si se hace un cambio de origen al punto  $T_b$ , se tiene que:

$$Dr = B_j(\bar{T}_i - T_b) + e_i$$

Donde:

$B_j$ : Es el incremento de  $Dr$  por cada unidad térmica más en la fase  $j$  del cultivo (con relación a  $T_b$ ) de un día ( $^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )

Es decir:

$$B_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^j (\bar{T}_i - T_b)}$$

luego,  $D_r = (\bar{T}_i - T_b) / \sum_{i=1}^j (\bar{T}_i - T_b)$ , para toda fase  $j$

Con base en este supuesto y en la Tabla 4, se construyó la Tabla 5, la cual contiene la variable indicadora de desarrollo para cada una de las fases fenológicas, durante el desarrollo del cultivo, con su correspondiente duración en días, tiempo térmico y coeficiente de desarrollo.

Lo anterior implica que deben definirse las unidades de desarrollo fenológico y asociar a cada una de ellas un  $B$ , de tal manera que con el dato de la temperatura media de un día se pueda estimar la tasa de desarrollo ( $Dr$ ) correspondiente a ese día, y mediante la integral de estos valores obtener el valor de la variable indicadora del estado de desarrollo del cultivo. Para tal fin, se consideró como temperatura base ( $T_b$ )  $10^{\circ}\text{C}$ , de acuerdo con los resultados de Jaramillo y Guzmán (55).

Para la estimación de la tasa de desarrollo diario o incremento diario de la variable indicadora del estado de desarrollo del cultivo en función de la temperatura media del día, se estableció que:

- Para:  $10^{\circ}\text{C}$  y  $T_m$   $22^{\circ}\text{C}$ , la tasa de desarrollo es  $Dr = B (T_m - 10)$ .
- Para:  $T_m < 10^{\circ}\text{C}$ , la tasa de desarrollo es cero, es decir,  $Dr = 0$ .
- Para temperaturas superiores a  $22^{\circ}\text{C}$  debe estudiarse el comportamiento de  $Dr$ .

### **Submodelo 5 (S5). Acumulación y distribución de la materia seca**

De manera consistente con el submodelo del desarrollo fenológico (S4), la distribución porcentual de los pesos secos se expresa en función de la variable

**Tabla 4.** Duración (días) aproximada de las fases fenológicas de *Coffea arabica* L. var. Caturra, en las condiciones de Chinchiná (Caldas), para un ciclo de cinco años.

Año	Fase		Para cosechas de mitaca			Para cosecha principal			
	Número	Nombre	Desde	Hasta	Duración (días)	Fase	Desde	Hasta	Duración (días)
1	1	Siembra a 1ª Floración	1º Mar	31 Jul	153				
	2	1ª Floración	1º Ago	30 Sep	61				
	3	1er Crecimiento fruto	1º Oct	30 Nov	61				
	4	1er Llenado fruto	1º Dic	31 Dic	31				
2	5	1er Llenado fruto	1º Ene	15 Mar	74	2ª Floración	1º Ene	31 Mar	90
	6	1ª Cosecha	16 Mar	31 May	77	2º Crecim.	1º Abr	30 Jun	91
	7	1ª Floración	1º Ago	30 Sep	61	2º Llenado	1º Jul	15 Sep	92
	8	3er Crecimiento fruto	1º Oct	31 Dic	92	2ª Cosecha	1º Sep	31 Dic	122
3	9	3er Llenado fruto	1º Ene	15 Mar	74	4ª Floración	1º Ene	31 Mar	90
	10	3ª Cosecha	16 Mar	31 May	77	4º Crecim.	1º Abr	30 Jun	91
	11	5ª Floración	1º Ago	30 Sep	61	4º Llenado	1º Jul	15 Sep	92
	12	5er Crecimiento fruto	1º Oct	31 Dic	92	4ª Cosecha	1º Oct	31 Dic	122
4	13	5er Llenado fruto	1º Ene	15 Mar	74	6ª Floración	1º Ene	31 Mar	90
	14	5ª Cosecha	16 Mar	31 May	77	6º Crecim.	1º Abr	30 Jun	91
	15	7ª Floración	1º Ago	30 Sep	61	6º Llenado	1º Jul	15 Sep	92
	16	7er Crecimiento fruto	1º Oct	31 Dic	92	6ª Cosecha	1º Oct	31 Dic	122
5	17					8ª Floración	1º Ene	31 Mar	90
	18	7er Llenado fruto	1º Ene	15 Mar	74	8º Crecim.	1º Abr	30 Jun	91
	19	7ª Cosecha	1º Mar	31 May	77	8º Llenado	1º Jul	15 Sep	92
	20					8ª Cosecha	1º Oct	31 Dic	122

indicadora de desarrollo (Dr), la cual describe el estado de desarrollo fenológico del cultivo, iniciando sus valores en la fecha de siembra definitiva en el campo.

Una vez identificada la fase del cultivo durante su crecimiento, viene el proceso de distribución de materia seca, para lo cual Riaño *et al.* (92) estimaron los coeficientes de la expresión que describen la distribución porcentual por órgano de la planta (Tabla 6).

Con la estimación porcentual para cada órgano, en función de la variable indicadora de desarrollo, se obtienen los valores de la distribución de materia seca por órgano de la planta de café, específicamente la producción de materia seca de frutos, con la cual por medio de un balance de materia seca materia fresca, se logra la estimación de la producción en kilogramos de café cereza por árbol - día (variable endógena). Con este proceso se termina la estructura básica para el modelo de simulación de la producción potencial del cultivo del café, como se representa en el Figura 5, en el cual se ilustra la cohesión de todos los submodelos descritos anteriormente.

**Tabla 5.** Valores de la variable indicadora de desarrollo (Dr), en cada fase fenológica, con sus correspondientes duraciones en días, tiempos térmicos (T) y coeficientes de desarrollo (B).

Año	Fase Fenológica			Período		Tiempo térmico		β	D	Fase
	Nº	Descripción	Desde	Hasta	Duración (días)	$\sum(\bar{T} - T)$	Acum.			
1	1	Siembra a 1ª Floración	1 mar	31 jul	153	1156,2	1.156,2	0,00086490	(0,1)	S-F1
	2	1ª Floración	1 ago	30 sep	61	455,0	1.611,2	0,00219780	(1,2)	F1
	3	1er Crecimiento Fruto	1 oct	30 nov	61	133,2	1.744,4	0,00750751	(2,3)	C1
	4	1er Llenado Fruto	1 dic	31 dic	31	999,6	2.741,0	0,00100341	(3,4)	L1
2	5	1er Llenado; 2ª Floración	1 mar	31 mar	90	1049,6	3.790,6	0,000952744	(4,5)	L1;F2
	6	1ª Cosecha; 2º Crecimiento	1 ago	30 jun	91	1043,3	4.833,9	0,000958497	(5,6)	M1;C2
	7	3ª Floración ; 2º Llenado	1 oct	30 sep	92	1049,1	5.883,0	0,000953198	(6,7)	F3;L2
	8	3er Crecimiento; 2ª Cosecha	1 dic	31 dic	92	996,6	6.879,6	0,001003412	(7,8)	C3;M2
3	9	3er Llenado; 4ª Floración	1 ene	31 mar	90	1049,6	7.929,2	0,000952744	(8,9)	L3;F4
	10	3ª Cosecha; 4º Crecimiento	1 abr	30 may	61	1043,3	8.972,5	0,000958497	(9,10)	M3;C4
	11	5ª Floración ; 4º Llenado	1 jun	30 ago	92	1049,1	10.021,6	0,000953198	(10,10)	F5;L4
	12	5º Crecimiento; 4ª Cosecha	1 sep	31 dic	122	996,6	11.018,2	0,001003412	(11,12)	C5;M4
4	13	5º Llenado; 6ª Floración	1 ene	31 mar	90	1049,6	12.067,8	0,000952744	(12,13)	L5;F6
	14	5ª Cosecha; 6º Crecimiento	1 abr	30 may	61	1043,3	13.111,1	0,000958497	(13,14)	M5;C6
	15	7ª Floración ; 6º Llenado	1 jun	30 ago	92	1049,1	14.160,2	0,000953198	(14,15)	F7;L6
	16	7º Crecimiento; 6ª Cosecha	1 sep	31 dic	122	996,6	15.156,8	0,001003412	(15,16)	C7;M6
5	17	7º Llenado; 8ª Floración	1 ene	31 mar	90	1049,6	16.206,4	0,000952744	(16,17)	L7;F8
	18	7ª Cosecha; 8º Crecimiento	1 abr	30 may	61	1043,3	17.249,7	0,000958497	(17,18)	M7;C8
	19	9ª Floración; 8º llenado	1 jun	30 ago	92	1049,1	18.298,8	0,000953198	(18,19)	F9;L8
	20	9º Crecimiento; 9º cosecha	1 sep	31 dic	122	996,6	19.295,4	0,001003412	(19,20)	C9;M8

S : Siembra.

C1 : Primer crecimiento del fruto y así sucesivamente C2 , C 3 , C4 , etc...

F1 : Primera floración y así sucesivamente F2 , F3 , F4 , etc...

L1 : Primer llenado del fruto y así sucesivamente L 2 , L3 , L4 etc...

M1 : Primera maduración (cosecha) y así sucesivamente M2 , M3 , M4 etc...(número par = cosecha principal; número impar = mitaca).

**Tabla 6.** Distribución porcentual de peso seco por órgano con relación al peso total de la planta y el estado de desarrollo del cultivo (Dr).

TT	Dr	Raíz	Tallo	Ramas	Hojas	Flores	Frutos
0,00	0,0000	0,1212	0,2026	0,0057	0,5795	0,0000	0,0000
1078,12	0,9325	0,2584	0,2092	0,0512	0,4813	0,0000	0,0000
2149,10	3,4061	0,3869	0,1652	0,0775	0,3704	0,0000	0,0000
3250,37	4,4853	0,3671	0,1458	0,1178	0,3693	0,0000	0,0000
4283,80	5,4727	0,4066	0,1638	0,1304	0,2880	0,0045	0,0067
5305,75	6,4498	0,3030	0,1754	0,1256	0,2807	0,0057	0,1097
6412,20	7,5310	0,2560	0,1452	0,1278	0,2995	0,0022	0,1694
7487,70	8,5794	0,2055	0,1465	0,1535	0,2911	0,0010	0,2023
8500,60	9,5477	0,2181	0,1683	0,1970	0,3324	0,0088	0,0755
9510,42	10,5047	0,2001	0,1828	0,2116	0,3139	0,0112	0,0805
50504,57	11,4846	0,1892	0,2028	0,2060	0,2770	0,0029	0,1222
11543,00	12,5000	0,1900	0,1500	0,2000	0,2600	0,0020	0,2000
12589,50	13,5000	0,2000	0,1800	0,2300	0,3000	-	0,0900
13635,65	14,5000	0,1900	0,1700	0,2300	0,3000	-	0,1000
14658,50	15,5000	0,1900	0,2000	0,2100	0,2800	-	0,1200
15631,60	16,5000	0,1900	0,1500	0,2000	0,2600	-	0,2000
16728,05	17,5000	0,2000	0,1800	0,2300	0,3000	-	0,0900
17774,25	18,5000	0,2000	0,1700	0,2300	0,3000	-	0,1000
18797,10	19,5000	0,1900	0,2000	0,2100	0,2800	-	0,1200
19820,20	20,5000	0,1900	0,1500	0,2000	0,2600	-	0,2000

### Tercera Etapa: Programación

Para la programación de la estructura del modelo se utilizó el lenguaje del módulo ILM del SAS, versión 5.0 y luego de evaluada la lógica del modelo, se transcribió a Visual Basic. Para correr el programa se requiere de la siguiente información de entrada: localidad o sitio, latitud, variedad, densidad y fecha de siembra y durante el período a simular, la temperatura media y número de horas de brillo solar diario.

En la estructura propuesta, la unidad de simulación es la hectárea, sembrada con un número de árboles, de las variedades Colombia o Caturra, que puede fluctuar entre 2.500 y 10.000 plantas.

### Cuarta Etapa: Evaluación y Validación

Para evaluar el nivel 1 o producción potencial se aplicó el modelo de simulación, con la información de temperatura media del aire y número de horas de brillo solar diario, registrado en

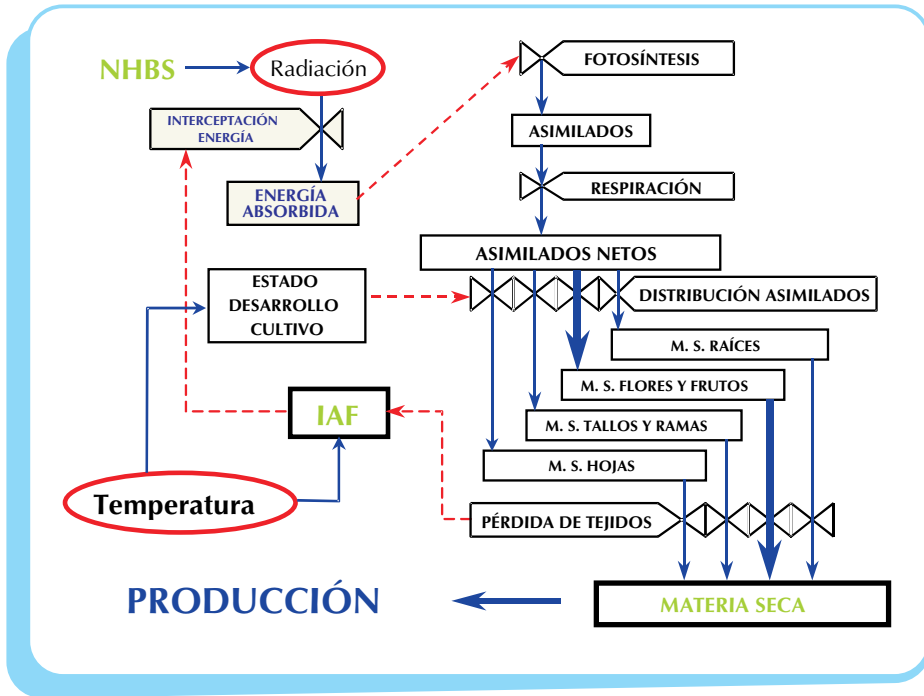
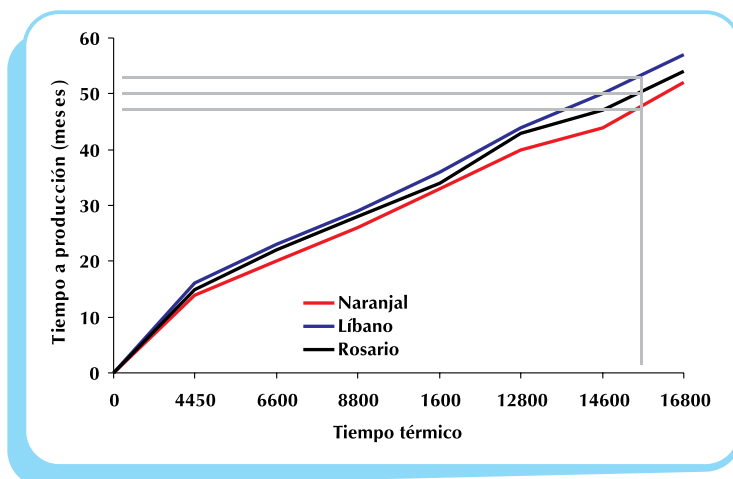


Figura 5. Diagrama de Forrester del modelo de simulación para la producción potencial del cultivo del café en Colombia.

el período 1980-1985, de las localidades de Paraguaicito (Quindío), Naranjal (Caldas) y Líbano (Tolima), con promedios de temperatura por día de 21,3°C, 20,6°C y 19,0°C, respectivamente. La simulación se hizo para la variedad Caturra, en tres densidades de siembra: 2.500, 5.000 y 10.000 plantas por hectárea. Los datos simulados mostraron que el modelo es lógico en su funcionamiento, en aspectos generales, como:

- A mayor temperatura, mayor índice de área foliar.
- A mayor temperatura, mayor producción por hectárea, dado que la estructura del modelo tiene en cuenta para efectos de la simulación, las unidades térmicas acumuladas, las cuales a su vez indican la influencia de la temperatura en el desarrollo del cultivo, de tal manera que para un mismo tiempo cronológico, representado en días después de la siembra, las unidades térmicas acumuladas en los tres sitios que se ilustran, no tienen el mismo valor. Es por ello que en unos sitios se da primero la cosecha que en otros, dado que se alcanzan más rápido las unidades térmicas necesarias para obtener la producción (Figura 6).
- A mayor densidad, menor materia seca acumulada por órgano de la planta, menor producción por árbol y mayor producción por hectárea.





**Figura 6.** Desplazamiento de la producción por efecto de la temperatura.

Los errores absolutos relativos, entre el valor observado o de referencia y el valor simulado de materia seca acumulada por planta, en los seis primeros trimestres del cultivo, en las tres localidades, fluctuaron entre 44,6 y 83,5%. A partir del séptimo trimestre del cultivo y durante cinco años, en Paraguaicito, estos errores variaron entre 7,3 y 43,0%, en Líbano fluctuaron entre 11,2 y 49,3% y en Naranjal entre 13,5 y 63,2%.

La relación lineal entre el valor de referencia y el valor simulado para la materia seca acumulada por planta, en las tres localidades, tuvo coeficientes de determinación entre 0,98 y 0,99 y los coeficientes de regresión fueron estadísticamente menores de 1, según prueba t al 5%, lo cual corrobora lo que se esperaba con el nivel 1 o producción potencial, que el modelo sobrestime el valor observado de materia seca acumulada.

### **Validación de la materia seca por órgano de la planta de café**

Para la validación de la materia seca por órgano de la planta se tomaron como referencia los valores observados de experimentos realizados en las localidades de Santágueda (Palestina), a 1.000 m de altitud; Naranjal (Chinchiná), a 1.400 m de altitud; y El Tablazo (Manizales), a 1.900 m de altitud, situadas en el departamento de Caldas, en las cuales se sembró el 15 de enero de 1996, café variedad Colombia, con una densidad de 5.000 plantas por hectárea. Los registros de materia seca se llevaron trimestralmente durante cuatro años, en los siguientes órganos: tallo, ramas, hojas y parte aérea de la planta.

El coeficiente de determinación, para la relación entre valores promedio por planta observado y simulado de materia seca, en cada uno de los órganos, fluctuó entre 0,60 y 0,99 y para la relación entre el límite superior para el promedio observado y el valor simulado por órgano, fluctuó entre 0,59 y 0,98.

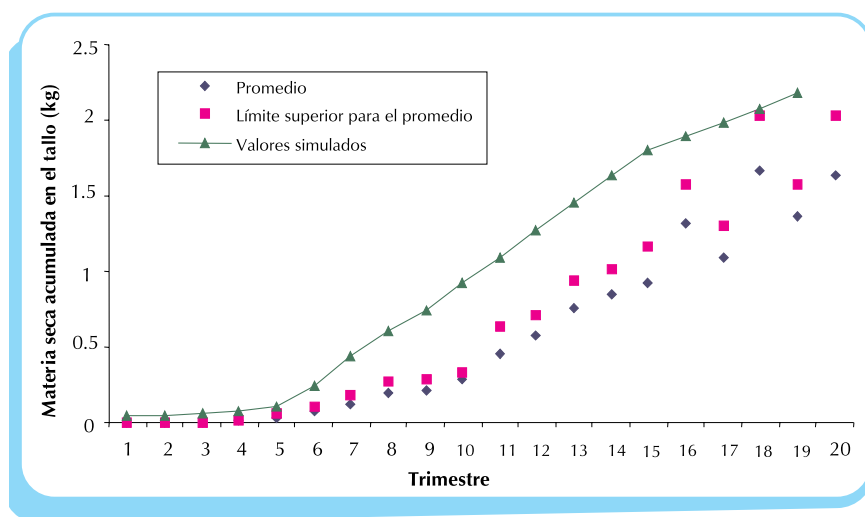
En Naranjal, el modelo sobrestimó (coeficientes de regresión menores de 1,0 estadísticamente, según prueba de t al 5%), tanto el promedio observado como el límite superior para el promedio de materia seca acumulada, en el tallo, las ramas, las hojas y la parte aérea; en Santágueda, para el único órgano que el modelo no sobrestimó la materia seca, fue en las hojas ( $b= 1,0$ ), y para el Tablazo el único órgano en el que el modelo no sobrestimó la materia seca fue en las ramas, de tal manera que el coeficiente de regresión fue igual a 1,0, para la relación entre el promedio observado y el valor simulado y mayor que 1,0 para la relación entre el límite superior para el promedio observado y el valor simulado.

En el 91,7% de los casos, al tener en cuenta todas las localidades y los órganos descritos (por ejemplo las Figuras 7, 8 y 9), el coeficiente de correlación, entre los valores observados y simulados, fue mayor del 80%, lo cual corroboró lo planteado como primera hipótesis de trabajo en la construcción del modelo para la producción potencial.

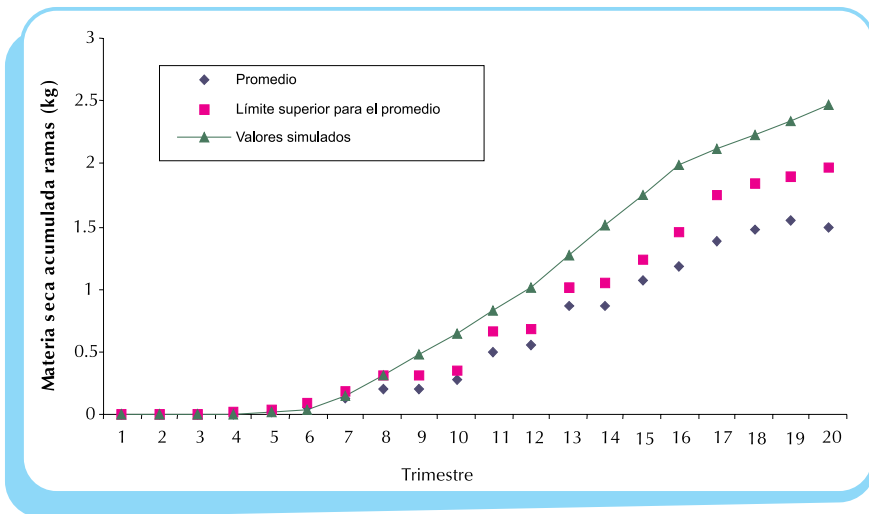
En el 83,3% de los casos, el modelo sobrestimó la materia seca acumulada por órgano, es decir, el coeficiente de regresión lineal fue estadísticamente menor de 1,0, según la prueba t al 5%, lo que corroboró lo planteado como segunda hipótesis de trabajo, criterio con el cual se tiene la estructura del modelo de simulación para la producción potencial del cultivo del café en Colombia.

### Validación de la materia seca acumulada de frutos

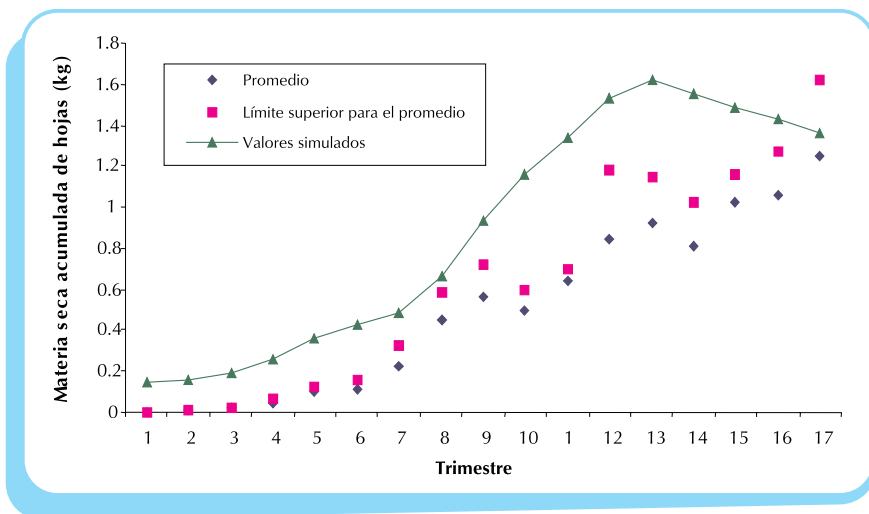
Se tomaron los valores observados de materia seca de frutos, registrados trimestralmente. La proporción de casos en los cuales el valor simulado supera el límite superior del intervalo



**Figura 7.** Valores simulados, promedio y límite superior, para la materia seca acumulada en el tallo. Santágueda (Palestina, Caldas).



**Figura 8.** Valores simulados, promedio y límite superior, para la materia seca acumulada en ramas. Santágueda (Palestina, Caldas).



**Figura 9.** Valores simulados, promedio y límite superior, para la materia seca acumulada en hojas. Naranjal (Chinchiná, Caldas).

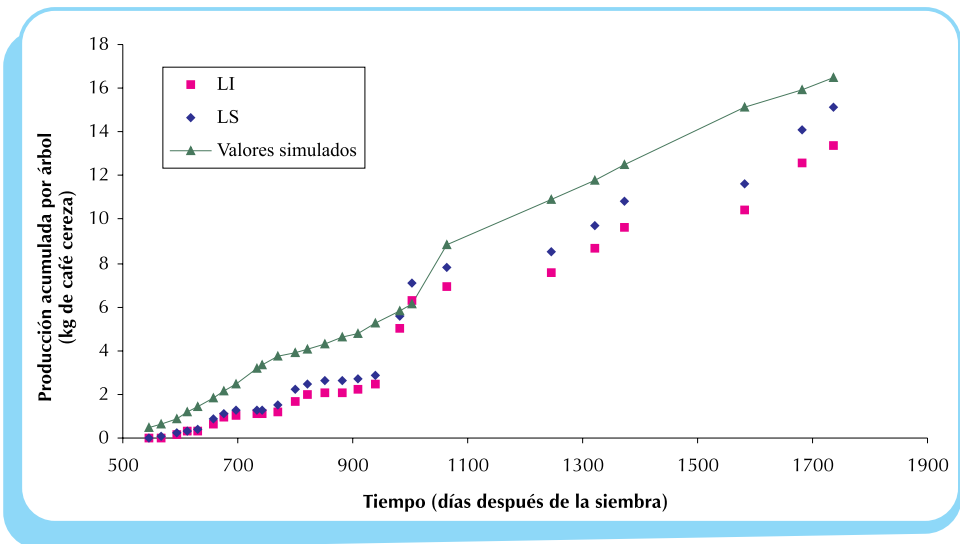
de confianza para el promedio de los valores observados es de 50,5, 70,5 y 82,9%, para El Tablazo, Naranjal y Santágueda, respectivamente, y en general, fue de 67,9%. En el 59, 84,8 y 87,6% de los casos, para El Tablazo, Naranjal y Santágueda, respectivamente, el valor simulado superó al valor promedio de la producción acumulada de materia seca de frutos.

Al establecer la relación lineal entre los valores del límite superior (para el promedio de los datos observados) y los simulados, para cada sitio, los coeficientes de correlación fueron superiores al 90%. Los coeficientes de regresión son estadísticamente diferentes de cero y menores de uno, según la prueba t al 5%, lo cual implica que en todos los casos evaluados el modelo sobrestima la producción acumulada de materia seca de frutos por árbol.

Los coeficientes de correlación lineal para la relación entre los valores promedio observados y valores simulados, fueron superiores al 92%, y los coeficientes de regresión fueron estadísticamente diferentes de cero y menores de uno, según la prueba t al 5%.

### Validación de la producción acumulada de café cereza

La proporción de casos en los cuales el valor simulado superó el límite superior del intervalo de confianza para el promedio de los valores observados fue de 92,5, 100 y 11,3%, para Naranjal (Figura 10), Santágueda y El Tablazo, respectivamente.



**Figura 10.** Valores simulados, límite inferior (LI) y límite superior (LS) del promedio, para la producción acumulada de café cereza por árbol. Naranjal (Chinchiná, Caldas).

El valor simulado superó al valor promedio observado de la producción acumulada de café cereza por árbol en el 95, 100 y 37,1% de los casos, para Naranjal, Santágueda y El Tablazo, respectivamente. En general, la proporción de casos fue del 76,9%.

Al establecer para cada sitio, la relación lineal entre los valores promedio observados y los valores simulados, los coeficientes de correlación fueron superiores a 93% y los coeficientes de regresión fueron estadísticamente diferentes de cero y menores de uno, según prueba t al 5%.

En todos los sitios, en la relación lineal entre los valores del límite superior para el promedio de los datos observados y los simulados, los coeficientes de regresión fueron diferentes de cero y menores de uno, estadísticamente, lo cual implica que el modelo sobrestima la producción acumulada de café cereza por árbol, en todos los casos evaluados.

Los resultados obtenidos hasta el momento con la validación del modelo de simulación para la producción potencial del cultivo del café (nivel 1), en general, muestran lo que se esperaba: sobrestimación de los valores promedios observados, por tratarse de la producción potencial.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes personas:

Doctor Gabriel Cadena Gómez, Director de Cenicafé, por confiar en el grupo interdisciplinario, al cual delegó su idea de construir y desarrollar un modelo de simulación para el cultivo de café.

A todos y cada uno de los investigadores de Cenicafé, que aportaron con su conocimiento y resultados experimentales.

A los jefes y auxiliares de la Subestación Experimentales de Cenicafé.

Al señor Hernando García, por su apoyo en la programación.

A los doctores Carlos Oliveros y Rubén Dario Medina, por la revisión del documento.

## LITERATURA CITADA

1. AMTHOR, J.S. Evolution and applicability of a whole plant respiration model. *Journal of Theoretical Biology* 122: 473-490. 1986.
2. AMTHOR, J.S. *Respiration and crop productivity*. New York, Springer Verlag, 1989. 215p.
3. ARACIL, J. *Introducción a la dinámica de sistemas*. Madrid, Alianza Editorial, 1978. 303 p.
4. ARAGÓN D., F.; GONZÁLEZ M., G.; GUZMÁN M., O.; QUIROGA Z., F.; SIMBAQUEVA F., O. Relación entre la radiación solar difusa y la radiación solar global en una localidad colombiana. *Cenicafé* 47(3):159-166. 1996.
5. ARCILA P., J. *Crecimiento y fenología del cafeto en Colombia*. Chinchiná, Cenicafé, 1991. 45 p.
6. ARCILA P., J. *Modelos para estimar la producción de los cafetales*. Chinchiná, Cenicafé, 1991. 25 p. (Mecanografiado).
7. ARCILA P., J. *Pronóstico de cosecha de café en Brasil*. Chinchiná, Cenicafé, 1987. 3 p. (Mimeografiado).
8. ARCILA P., J.; CHAVES C., B. *Estimación de la cosecha cafetera con base en los comportamientos de producción*. Cenicafé -Chinchiná-Colombia. 1991. 45 p.
9. ARCILA P., J.; CHAVES C., B. *Desarrollo foliar del cafeto en tres densidades de siembra*. *Cenicafé* 46(1): 5-20. 1995.
10. ARCILA P., J.; JARAMILLO, O. *Propuesta de una metodología para el pronóstico de la cosecha de café a nivel regional*. Chinchiná, Cenicafé, 1987. 14 p. (Mimeografiado sin publicar).
11. ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.; MORENO B., A.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. *Sistemas de producción de café en Colombia*. Cenicafé-Chinchiná-Colombia. 2007. 309 p.
12. ASHLEY, D.A.; DOSS, B.D.; BENNETI, O.L. Relation of cotton leaf area index to plant growth and fruiting. *Agronomy Journal* 57:61-64. 1965.
13. BECERRIL R., A. E.; ORTEGA O., C.A. *Predicción de rendimientos mediante regresión lineal en el cultivo del cafeto (Coffea sp.)*. *Chapingo Nueva Época* 15:13-19. 1979.
14. BECKER, P.; WEINGARTEN, D.S. A comparison of several models for separating direct and diffuse components of solar irradiation. *Agricultural and Forest Meteorology* 53:347-353. 1991.
15. BONHOMME, R. *The solar radiation: Characterization and distribution in the canopy*. In: Varlet G., C.; Bonhomme, R.; Sinoquet, H. (Eds.). *Crop structure and light microclimate: characterization and applications*. Paris, INRA, 1993. p. 17-28.
16. BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal* 88:704-716. 1996.

17. BROWNING, G. ; DORWARD, A. A survey methodology for assessing yield potential and Coffee berry loss in peasant coffee. *Experimental Agriculture* 25(2): 235-242. 1989.
18. BROWNING, G. ; FISHER, N. High density coffee. Yield results for the first cycle from systematic spacing designs. *Kenya Coffee* 41(483):209-217. 1976.
19. CANNELL, M.G.R. Production and distribution of dry matter in trees of *Coffea arabica* L. in Kenya as affected by seasonal climatic differences and the presence of fruits. *Annals of Applied Biology* 67(1):99-120. 1971.
20. CANNELL, M.G.R. Effects of irrigation, mulch and N-Fertilizers on yield components of *Coffea arabica* in Kenya. *Experimental Agriculture* 9:225-232. 1973.
21. CANTOR, F.; CURE, J.R.; OROZCO DE A., M. Simulación del crecimiento y desarrollo de *Gypsophila paniculata* var. Perfecta, incluyendo el efecto de vernalización. *In: Reunión de la Red de la Sociedad Internacional de Biometría para Centro América, El Caribe, Colombia y Venezuela*, 4. Santa Marta, Junio 11-15, 1995. . Resúmenes de Comunicaciones.
22. CARVALHO, M.M. DE; SOUZA, P. DE; ABREU, M.S. DE Influencia da densidade plantas na area foliar do cafeiro (*Coffea arabica* L.). *Agros* 2(1): 19-28. 1972.
23. CASTILLO R., E.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; SANABRIA R., J. Estructura del dosel e interceptación de la radiación solar en café *Coffea arabica* L. var. Colombia. *Cenicafé* 47(1): 4-15. 1996.
24. CASTILLO R., E.; JARAMILLO R., A.; ARCILA P., J.; SANABRIA R., J. Coeficientes de extinción de la radiación fotosintéticamente activa en *Coffea arabica* L. *Atmósfera* 24:65-70. 1996.
25. CASTILLO Z., J. Analysis of the yield of some coffee varieties grown in Colombia and Brasil. Raleigh, North Carolina State University, 1964. 84 p. (Thesis: Magister Science).
26. CRECE. Centro Regional de Estudios Cafeteros y Empresariales. Manizales. Colombia. Modelo para estimar la producción registrada de café en Colombia. Informe final. 1990. 42 p.
27. CHAPMAN, S.C.; HAMMER, G.L. ; PALTA, J.A. Predicting leaf area development of sunflower. *Field Crops Research* 34:101-112. 1993.
28. DEAN, L. A. Relationship between rainfall and coffee yield in Kona District. Hawaii. *Journal of Agricultural Research*. 59:217-222. 1939.
29. DOGNIAUX, R. (Ed.). Prediction of solar radiation in areas with a specific microclimat. Dordrecht, Kluwer Academy Publishers, 1994. 107 p.
30. FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma., Italia Informe del Proyecto de zonas agroecológicas. Volumen 3. Metodología y resultados para América del Sur y Central. Roma, FAO, 1981. 253 p.

31. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA – FNC. BOGOTÁ. COLOMBIA. Manual del cafetero colombiano. 4. ed. Bogotá, FNC, 1979. 152 p.
32. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé. Chinchiná, Colombia. 40 años de investigaciones en Cenicafé. 1983. 56 p.
33. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA – FNC. BOGOTÁ. COLOMBIA. DIVISIÓN DE PLANEACIÓN. La producción, el ingreso de los productores y el Fondo Nacional del Café. Bogotá, FNC, 1984. 67 p. (Mimeografiado sin publicar).
34. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA – FNC. BOGOTÁ. COLOMBIA. DIVISIÓN DE PLANEACIÓN. Términos de referencia para el Sistema Regional de Planificación cafetera. Bogotá, FNC, 1987. 67 p. (Mimeografiado sin publicar).
35. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Centro Nacional de Investigaciones de Café- Cenicafé. Chinchiná, Colombia. 50 años de CENICAFÉ. 1938-1988. Conferencias conmemorativas. Chinchiná, Cenicafé, 1990. 255 p
36. FORRESTER, J. W. Industrial dynamics. Massachusetts, Institute of Technology Press, 1961. 449p.
37. FRANCE, J.; THORNLEY, J.H.M. Mathematical models in agriculture. London. Butterworths, 1984. 335 p.
38. GÓMEZ G., L. Influencia de los factores climáticos sobre la periodicidad de crecimiento del cafeto. *Cenicafé* 28(1):3-17. 1977.
39. GÓMEZ G., L.; GUZMÁN M., O. Relación empírica entre la radiación solar global y el brillo solar en el área de Cenicafé, Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 46(4): 205- 218. 1995.
40. GÓMEZ, L.F.; LÓPEZ, J.C.; RIAÑO, N.M.; LÓPEZ, Y; MONTOYA, E.C. Diurnal changes in leaf gas exchange and validation of a mathematical model for coffee (*Coffea arabica* L.) canopy photosynthesis. *Photosynthetica* 43(4):575-582. 2005.
41. GOUDRIAAN, J. Crop micrometeorology; a simulation study. Wageningen, PUDOC, 1977. 249 p.
42. GOUDRIAAN, J. Potential production processes. *In*: Penning de Vries, F. W. T. ; Laar, H.H. van (Eds.). Simulation of plant growth and crop production. Wageningen, PUDOC, 1982. p. 98-113.
43. GOUDRIAAN, J . A simple and fast numerical method for the computation of daily total of crop photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology* 38(1-3). 249-254. 1986.
44. GOUDRIAAN, J. The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* 43: 155-169. 1988.
45. GOUDRIAAN, J.; MONTIETH, J.L. A mathematical function for growth based on light interception and leaf area expansion. *Annals of Botany* 66(6):695 - 701. 1990.



46. GOUDRIANN, J.; LAAR, H.H. VAN Calculation of daily totals of the gross CO<sub>2</sub> assimilation of leaf canopies. *Netherlands Journal of Agriculture Science* 14:373-383. 1978.
47. GOUDRIAAN, J.; LAAR, H.H. VAN Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1994. 238 p. (Current Issues in Production Ecology Vol 2.)
48. GRABLE, A. R. The future of applied plant growth modelling. In: Wisiol, K.; Hesketh, J.D. (Eds.). *Plant growth modelling for resource management*. Boca Raton, CRC Press, 1987. p. 142-155.
49. GUTIÉRREZ, A.P., VILLACORTA, A., CURE, J.R.; ELLIS, C.K. A. Tritrophic analysis of the coffee (*Coffea arabica*) – coffee berry borer (*Hypothenemus hampei* Ferrari)- parasitoid system. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil* 27(3) 357-385. 1998.
50. HAMMER, G.L.; CARBERRY, P.S.; MUCHOW, R.C. Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum. I. Whole plant level. *Field Crops Research* 33:293-310. 1993.
51. IBSNAT. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. The IBSNAT Decade. Tsuji, G.Y and S. Balas (Eds) . Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources. Honolulu, University of Hawaii, 1993. 178p.
52. IFDC. International Fertilizer Development Center. Muscle Shoals. Estados Unidos. Report 1990. Programa de Entrenamiento. Nuevo método para pronosticar rendimiento de cosechas. Muscle Shoals, IFDC, 1990. 7 p.
53. IFDC. International Fertilizer Development Center. Muscle Shoals. Estados Unidos Report 1991. Red desarrolla modelo sobre cosechas de tubérculos. Muscle Shoals, IFDC, 1991. 6p.
54. JACKSON, J. E. Light interception and utilization by orchard system. *Horticultural Review* 2:208-267. 1980.
55. JARAMILLO R., A.; GUZMÁN M., O. Relación entre la temperatura y el crecimiento en *Coffea arabica* L. variedad Caturra. *Cenicafé* 35(3):57-65. 1984.
56. JARAMILLO R., A.; LARSEN, L.O. ; ARCILA P., J. Un modelo para evaluar la influencia del clima en la producción de café. *Cenicafé* 43(1): 22-26. 1992.
57. JARAMILLO R., A.; VALENCIA A., G. Los elementos climáticos y el desarrollo de *Coffea arabica* L. en Chinchiná. (Colombia) *Cenicafé* 31 (4):127-143. 1980.
58. JARAMILLO, C. F. Un modelo econométrico de la producción cafetera de Caldas. Bogotá, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1987. 8 p.
59. JARAMILLO, C. F. Un método econométrico para calcular curvas de producción cafetera. Aplicación a la caficultura de Chinchiná y Palestina, Caldas. Manizales, Comité de Cafeteros de Caldas, 1987. 10p.
60. JARAMILLO, C. F. Análisis comparativo de dos modelos de producción cafetera. *In: Ocampo, J.A* (Ed.). *Lecturas de economía cafetera*. Bogotá, Fedesarrollo, 1987. p 43 – 64.

61. JONES, J.W.; MISHOE, J.W.; BOOTE, K. J. Introduction to simulation and modeling. Taipei, ASPAC - Food and Fertilizer Technology Center, Technical Bulletin No. 100. 1987. 19p
62. JONES, J.W.; RITCHIE, J.T. Crop growth models. *In*: Hoffman, G.J.; Howell, T.A.; Solomon, K.H. (Eds.). Management of farm irrigation systems. St. Joseph, ASAE, 1990. p. 63-89.
63. KUGURA, F.M.; FISHER, N.M.; BROWNING, G. ; MITCHELL, H. W. Effect of tree density on yield and some yield components of coffee arabica in Kenya. *Acta Horticulturae* 65:101-116. 1978.
64. LEIBOVICH, J. La producción de un cultivo permanente. Aplicación de un modelo de corto y mediano plazo al café en Colombia. *In*: Ocampo, J. A. (Ed.). Lecturas de economía cafetera. Bogotá, Fedesarrollo, 1987. p 65 – 103.
65. LEITE, O. S. Pesquisa de safra a través de técnica de mostragem baseada em levantamentos aerofotogramétricos. *Revista Brasileira Estat.* Rio de Janeiro 37(147):289-306. 1976.
66. LEMEURE, R. ; BLAD, B.L. A critical review of light models for estimating the shortwave radiation regime of plant canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 14:225- 286. 1974.
67. LIU, W. T. H. ; LIU. B. W. Y. Comparacao de tres modelos de previsao de safra de café no estado de Minas Gerais. *Ciencia e Cultura* 40(8):801-807. 1988.
68. MACHADO S., A. Pronóstico de las cosechas del cafeto. Algunos aspectos de los primeros trabajos exploratorios. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 16(17):63-93. 1955.
69. McDERMITT, D.K.; LOOMIS, R.S. Elemental composition of biomass and its relation to energy content, growth efficiency and growth yield. *Annals of Botany* 48:275-290. 1981.
70. McKINNION, J.M.; BAKER, D.N.; WHISLER, F.D.; LAMBERT, J.R. Application of the GOSSYM/COMAX system to cotton crop management. *Agricultural Systems* 31: 55-65. 1989.
71. MERINO, J.; FIELD, C. ; MOONEY, H.A. Construction and maintenance costs of mediterranean – climate evergreen and deciduous leaves. II. Biochemical pathway analysis. *Acta Oecologica/Oecologia Plantarum* 5:211-229. 1984.
72. MESTRE M., A. Determinación de la tasa óptima de fertilización en plantaciones de café sin sombrero. *Cenicafé* 28(2):51-60. 1977.
73. MIGUEL, A.E.; MATIELLO, J.B. ; FRANCO, C.M. Efeitos de diferentes niveis de desfolha na producao do cafeeiro. *In*: CONGRESSO Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, 5. Guarapari, Outubro 18-21, 1977. Resumos. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Café, 1977. p. 247-248.
74. MONACO, L.C. Variabilidade na area foliar do cafeeiro. *Ciencia e Cultura. Suplemento* 24(6):402. 1972.
75. MONTEITH, J. L. The quest for balance in crop modelling. *Agronomy Journal* 88:695-697.1996.
76. MUÑOZ, M., A. Impacto Agroclimatólogo y productividad cafetera. Manizales, Corporación Autónoma Universitaria de Manizales, 1982. 45 p.

77. NAYLOR, T. H.; BALINTFLY, J. L.; BURDICK, D. S.; KONG, CH. Técnicas de simulación en computadoras. México, Limusa, 1975. 157p.
78. NORMAN, J.M.; CAMPBELL, G.S. Canopy structure. *In: Pearcy, R. W.(Ed.). Plant physiological ecology; field methods and instrumentation.* Londres, Chapman and Hall, 1989. p. 302-325.
79. ONG, C.K. ;BAKER, C.K. Temperature and leaf growth. *In: Baker, N.R.; Davies, W.J. ; Ong, C.K. Control of leaf growth.* Cambridge, Cambridge University Press, 1985. 349 p. (Society for Experimental Biology Seminar Series Vol. 27).
80. ORTIZ, E.; SIMON, E. ; PINO, M. DE LOS A. Superficie foliar del caféto (*C. arabica* Pierre. Variedad Robusta con tres años de plantado. *Cultivos Tropicales* 11:63-76. 1989.
81. PASSIOURA, .B. Simulation models: Science, snake oil, education, or engineering. *Agronomy Journal* 88: 690-694. 1996.
82. PENNING DE VRIES, F.W.T. Systems analysis and models of crop growth. *In: Penning de Vries, F.W.T. ; Laar, H.H. van (Eds.). Simulation of plant growth and crop production.* Wageningen, PUDOC, 1982. p. . 9-19 p. (Simulation Monographs).
83. PENNING DE VRIES, F.W.T.; SPITTERS, C.J.T. The potential for improvement in crop yield simulation. *In: Muchow, R.S.; Bellamy, J.A. (Eds.). Climatic risk in crop production: Models and management for semiarid tropics and subtropics.* Wallingford, CAB International, 1991. p 123 - 140.
84. PENNING DE VRIES, F.W.T.; LAAR, H.H. VAN (Eds.). Simulation of plant growth and crop production. Wageningen, Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1982. 308 p
85. PENNING DE VRIES, F.W.T.; BRUNSTING, A.H.M.; LAAR, H.H. VAN. Products requirements and efficiency of biosynthesis: a cuantitative approach. *Journal of Theoretical. Biology* 45:339-377. 1974.
86. POCHET, P. Previsions de l´importance desrecoltes dans les cafeiers de Yangambi. *Bulletin d'Information de l'INEAC* 9(2):71:79. 1960.
87. QUIROGA Z., F.; OROZCO G., L.; ARCILA P., J.; RIAÑO H., N.M.; JARAMILLO R., A.; MONTOYA R., E.C. Simulación matemática de la producción potencial del cultivo del café. *In: Reunión de la Red de la Sociedad Internacional de Biometría para Centro América, El Caribe, Colombia y Venezuela, 4. Santa Marta, Junio 11-15, 1995. Resúmenes.* Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1995. p. 26.
88. RABBINGE, R.; WARD S.A.; LAAR, H.H. VAN 1989. Simulation and systems management in crop protection. Wageningen, Pudoc, 1989. 420 p. (Simulation Monographs).
89. RABBINGE, R.; WIT, C. T. DE Systems models and simulation. *In: Rabbinge, R. ; Ward, S.A. ; Laar, H.H. van (Eds.). Simulation and systems management in crop protection.* Wageningen, Pudoc, 1989. p. 3-12. (Simulation Monographs Vol. 32).
90. REDDY, K.J.; HODGES, H.E.; MCKINION, J.M. Crop modeling and applications: A cotton example. *Advances in Agronomy* 59:225-290. 1997.

91. REFFYE, P. DE ; SNOECK, J. ; JAEGER, M. Modelisation et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier. In: Colloque Scientifique International sur le Café, 13. Paipa, Aout 21-25, 1989. París, ASIC, 1989. p. 523-546.
92. RIAÑO H., N.M; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A., CHAVES C., B. Acumulación de materia seca y extracción de nutrimentos por *Coffea arabica* L cv. Colombia en tres localidades de la zona cafetera central. *Cenicafé* 55(4): 265-276. 2004.
93. ROSS, J. Radiative transfer in plant communities. In: Montieth, J.I. (Ed.). *Vegetation and atmosphere*. Vol. I New York, Academic Press, 1975. p. 13-52.
94. SAEKI, T. Ligth relations in plant communities. In: Evans L. (Ed). *Environmental control of plant growth*. New York, Academic Press, 1993. p. 79-94.
95. SALAZAR A., N.; OROZCO C., F. J. ; CLAVIJO, P. Características morfológicas productivas y componentes del rendimiento de dos variedades de café: Caturra y Colombia. *Cenicafé* 39(2): 43-60. 1988.
96. SINGH, V.; GODWING, D.C. ; HUMPHRIES, C.G. ; RITCHIE, J.T. A computer model to predict the growth and development of cereals. In: Summer Computer Simulation Conference. Austin, July 24-27, 1989. Proceedings. p. 668-675.
97. SINGH, U.; RITCHIE, J.T. ; TSUJI, G.Y. Simulation models for crop growth. *Chemicals International*, 14(6):23-24. 1992
98. SINOQUET, H.; ANDRIEU, B. The geometrical structure of plant canopies: Characterization and direct measurements methods. In: Varlet G., C. ; Bonhomme, R.; Sinoquet, H. (Eds). *Crop structure and light microclimat characterization and applications*. Paris, INRA, 1993. p 131-158.
99. SPITTERS, C.J.T.; KEULEN, H. VAN; KRAALIGNN, D.W.G. VAN A simple and universal crop growth simulator: SUCROS 87. In: Rabbinge, R.; Ward, S.A.; Laar, H.H. Van (Eds). *Simulation and systems management in crop production*. Wageningen, Pudoc, 1989. p 147 - 181.
100. SPITTERS, C.J.T.; TOUSSAINT, H.A.J.M.; GOUDRIAAN, J. Separating the diffuse a direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part I. Components of incoming radiation. *Agricultural and Forest Meteorology* 38(1-3):217-229. 1986a
101. SPITTERS, C.J.T.; TOUSSAINT, H.A.J.M. GOUDRIAAN, J. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology* 38(1-3): 231- 242. 1986b
102. SNOECK, D. Simulation de la croissance de cinq cultivars *Coffea arabica* L. par l'analyse des cimes. *Café, Cacao, Thé* 35(3):1771-190. 1991.
103. SUÁREZ DE CASTRO, F. Relaciones entre las lluvias y la producción del café. *Café* 2(7): 93-103. 1960.

104. SYVERTSEN, J.P.; ALLEN J.C. ; STAMPER J. H. Mathematical models of tree growth help citrus research. *The Citrus Industry* 66: 62-64. 1985.
105. THORNTON, P.K. Application of crop simulation models in agricultural research and development in the tropics and subtropics. Muscle Shoals, International Fertilizer Development Center, 1991. 23 p. (IFDC Paper Series No. 15)
106. URIBE H., A. ; MESTRE M., A. Efecto de la densidad de población y de la disposición de los árboles en la producción de café. *Cenicafé* 39(2):31-42. 1988.
107. VALENCIA A., G. Relaciones entre el Índice de área foliar y productividad del café. *Cenicafé* 24(4):79-89. 1973.
108. VALLEJO, C. Bases para la racionalización de la producción colombiana de café. Bogotá, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. División de Planeación y Proyectos Especiales, 1984. (Mecanografiado) (DT-84003).
109. VASUDEVA, N.; RATAGERI, M.C. Studies on leaf to crop ratio in two commercial species of coffee grown in India. *Journal of Coffee Research* 11(4):129-136. 1981.
110. VERNALHA, M.M.; GABARDO, J.C.; SILVA, R.P. DA; LEAL, J. Foliar area of coffee trees in the state of Parana. *Acta Biologica Parana* 2(1-4):121-131. 1973.
111. WHISLER, F.D.; ACOCK, B.; BAKER, D.N.; FYE, R.E.; HODGES, H.F.; LAMBERT, J.R.; LEMON, H.E.; McKINNION, J.M. ; REDDY, V.R. Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy* 40. 141-208. 1986.
112. WISIOL, K. Choosing a basic for yield forecast and estimates. *In: Wisiol, K. ; Hesketh, J.D. (Eds.). Plant growth modelling for resource management. Boca Raton, CRC Press, 1987. Pp 75 – 103.*
113. WIT,C.T. DE. Photosynthesis of leaf canopies. Wageningen, Pudoc, 1977. 88 p. (Agric. Res. Report No. 663).
114. WIT. C. T. DE. Coordination of models. *In: Penning de Vries, F.W.T ; Laar, H.H. van (Eds.). Simulation of plant growth and crop production. Wageningen, Pudoc, 1982a. p. 26-31. (Simulation Monographs).*
115. WIT. C. T. DE. Simulation of living systems. *In: Penning de Vries, F.W.T. ; Laar, H.H. van (Eds.). Simulation of plant growth and crop production. Wageningen, Pudoc, 1982b. p. 3-8. (Simulation Monographs).*
116. WIT. C. T. DE. ; PENNING DE VRIES, F.W.T. L´analyse des systemes de production primaire. *In: Penning de Vries, F.W.T. ; Djiteye, M.A. (Eds.). Le productivité des paturages Sahéliens. Wageningen, Pudoc, 1982. p. 20-23. (Agr. Res. Rep. No. 918).*
117. ZAMBRANO R., H. Un modelo para simular y proyectar la producción de café en Colombia. Bogotá, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1984. 12 p.
118. ZAMBRANO R., H. Tendencias de la caficultura colombiana. *Economía Colombiana* 179: 34-46. 1986.