

Diseño de un sistema experto de agricultura de plantaciones para palma de aceite*

Design of a plantation agriculture expert system for oil palm

AMITABHA GUHA; JAYANTA GUHA¹

RESUMEN

Este artículo discute el diseño de un sistema de soporte lógico (software) para el manejo de una plantación - el Sistema Experto de Agricultura para Plantaciones - PAXSYS - desarrollado por ARAB para que actúe como un sistema de apoyo para la toma de decisiones de la empresa en la administración de las plantaciones. El sistema fue desarrollado para palma de aceite (PAXSYS para Palma de Aceite). Sin embargo, la arquitectura básica de ingeniería del sistema del software podría ser utilizada y desarrollada para el manejo de otros cultivos de plantación. Se debe anotar que PAXSYS no está diseñado como un sistema de contabilidad para la plantación, aunque alguna información sobre costos y otros temas de contabilidad se pueden ingresar en PAXSYS para apoyar sus sistemas/algoritmos de toma de decisiones. Sin embargo, su sub-sistema Financiero se puede convertir en un sistema de contabilidad de la finca basado en transacciones o puede ser integrado con sistemas de contabilidad de terceros. El sistema fue diseñado para rastrear, en los niveles más bajos, todos los datos a nivel de bloques - agronómicos, de producción, operacional y financiero, ya sea con base mensual o anual. Luego, el sistema es capaz de resumir dichos datos para la administración, permitiéndole analizar los datos interactivamente. Además, también es capaz de interpretar y/o analizar los datos mediante el establecimiento de una función operativa de producción. El clima/precipitación, el suelo y la nutrición de las plantas, el terreno/textura del suelo y otras variables agronómicas están ligadas a los rendimientos por dicha función de producción. Este vínculo - una función de producción definida - es necesario para tomar decisiones racionales sobre el uso económico de los insumos - primordialmente la mano de la obra y los fertilizantes y el uso óptimo de los recursos naturales - tierra y clima. Por lo tanto, muy generalmente, el sistema integra modelos agronómicos y agro-climáticos con los datos operacionales de la plantación para permitir una mejor evaluación de los datos y la toma de decisiones por parte de la administración de la plantación. El sistema también fue diseñado para hacer los datos disponibles dentro del sistema a todos los niveles de la administración - desde el nivel divisional, a los niveles administrativos de la plantación, hasta el nivel de la sede central. Además, los empleados técnicos, financieros y de operaciones, todos pueden interactuar directamente con el sistema a través de una red de computadores. Se puede obtener información actualizada sobre PAXSYS de la página en el Internet de ARAB: www.arabis.org. Última Edición: 26 de febrero de 1997.

1 Agricultural ResearchNAdvisory [Sdn] Berhad (ARAB) 3.5 mi Kajang-SerdangRd, Kajang, 43000 Selangor, Malaysia.
E-mail: arab@arab.po.my

S U M M A R Y

This paper discusses the design of a plantation management software system - Plantation Agriculture eXpert SYStem - PAXSYS - developed by ARAB to act as an enterprise decision support system in the management of estates. The system was developed for oil palm (PAXSYS for Oil Palm). However, the basic engineering architecture of the software system could be used and built on for the management of other plantation crops. It is to be noted that PAXSYS is not designed as an estate accounting system, although some cost and other accounting information may be inputted into PAXSYS for supporting its decision making systems/algorithms. However, its Financial sub-system can be converted to a transaction based estate accounting system or be integrated with third party accounting systems. The system was designed to track at the lowest levels, all block level data - agronomic, production, operational and financial, either on a monthly or annual basis. The system is then able to summarize such data for management, allowing the latter to analyze the data interactively. In addition, it is also able to interpret and/or analyze the data by establishing an operating production function. Climate/rainfall, soil and plant nutrition, soil terrain/texture and other agronomic variables are linked to yields by such a production function. Such a link - a defined production function - is necessary for making rational decisions on the economic use of inputs - primarily labour and fertilizer and the optimum usage of natural resources - land and climate. Thus very broadly, the system integrates agronomic and agro-climatic models with estate operational data to enable better data evaluation and decision making by estate management. The system was also engineered to make available the data within it to all levels of management - from the divisional level to the estate management levels to headquarters level. Further, technical, financial and operational people can all directly interact with the system over a computer network. Updated information on PAXSYS can be obtained from ARAB's Web Site on the Internet: www.arabis.org.

Palabras claves: Palma de aceite, Plantaciones, Modelos matemáticos, Programas de computador, Automatización, PAXSYS, Rendimiento.

I N T R O D U C C I Ó N

La necesidad de circular los hallazgos de investigación sobre palma de aceite para el uso cotidiano y el requisito de la administración de las plantaciones de tomar rápidamente decisiones técnicas y financieramente justificables, impulsó a los autores a desarrollar un sistema experto para la administración de plantaciones, denominado PAXSYS, para ponerlo en práctica en las plantaciones. Por lo tanto, PAXSYS incorpora muchos resultados de investigación prácticos y relevantes y los hace disponibles para la administración de plantaciones para ayudarles a tomar decisiones de manejo justificables.

Tomar decisiones en la administración de un cultivo agrícola es muy difícil debido a la multitud de factores/variables en juego. El clima/precipitación, el suelo y la nutrición de las plantas, el crecimiento de las plantas, el terreno/textura del suelo y otras variables agronómicas hacen difícil vincular la producción del cultivo directamente con los insumos; por ejemplo, desarrollar una función de producción. Dicho vínculo - una función de producción definida - es necesario para tomar decisiones sobre el uso económico de insumos (principalmente mano de obra y fertilizantes en palma de aceite) y el uso óptimo

de recursos naturales (la tierra y el clima). El uso de principios de optimización de "costo marginal - beneficio marginal" hace imperativo que primero se defina una función de producción realista.

Aún si se estableciera dicho vínculo, el número de factores en juego y la naturaleza temporal de algunos de esos factores hacen que sea casi imposible que la mente humana los analice - especialmente en una base de bloque por bloque, por ejemplo, en la vida real. Esto es aún más difícil, dado que la palma de aceite es un cultivo perenne, donde un insumo en cualquier punto en el tiempo puede tener un efecto más de una vez unos pocos años más tarde.

Sin embargo, se hizo un esfuerzo (con la ayuda computarizada de un computador) para establecer dicha función de producción intertemporal de palma de aceite, para una plantación basada en datos actuales e históricos de esa plantación en particular. La validez de cualquiera de estas funciones de producción, por supuesto, dependería de su capacidad de pronosticar rendimientos (la producción total) dados los insumos variables y estáticos - precipitación, crecimiento de la palma, estado nutritivo, etc. Este artículo describe las bases técnicas de

la formulación de tal modelo de función de producción y la forma como ha sido utilizado en PAXSYS para facilitar a la administración de las plantaciones. La facultad a la administración de las plantaciones se realiza al permitir a la administración que lleve a cabo análisis de datos rápidamente, es decir, en un mínimo de tiempo y en forma técnicamente sólida. Dicho análisis técnicamente justificado luego puede ser utilizado con los principios de costo-beneficio para llegar a una decisión justificada. En esencia, por lo tanto, PAXSYS está preparado para permitir a la administración tener más tiempo para implementar una decisión sin demoras. Adicionalmente, elimina la necesidad de gastar tiempo buscando datos y haciendo un análisis manualmente, y en la mayoría de los casos, de manera apropiada.

El artículo comienza describiendo en forma general la arquitectura y capacidades del sistema PAXSYS (aunque esto se hace mejor por medio de una demostración en vivo del sistema). Luego procede a presentar los principios detrás del modelo de la función de producción que se construyó. Esto ha permitido la predicción del rendimiento mensual para 12 meses (a nivel de bloque) utilizando datos actuales e históricos de una plantación comercial grande de palma de aceite. También se presentan principios generales del sistema de Optimización de Fertilizantes y Mano de Obra. Finalmente se discute la utilidad del PAXSYS en un ambiente de la administración de una plantación comercial.

CONCEPTOS DEL DISEÑO DEL SISTEMA

A. Arquitectura Agro- Técnica del PAXSYS

El sistema de software PAXSYS - esencialmente un sistema de base de datos de relaciones y espacial - se ha diseñado y construido para representar información de la plantación a los niveles de bloques, divisiones y fincas en forma temporal así como espacial. Tiene características para su incorporación a una red para facilitar que los datos sean compartidos y trasladados por/a usuarios de sistemas múltiples para ayudarles a llevar a cabo sus respectivas funciones de trabajo eficiente y armoniosamente.

En el diseño de PAXSYS se tuvieron en cuenta las siguientes restricciones:

- Sólo datos normalmente mantenidos por la plantación se podrían utilizar como entradas al sistema;
- El sistema debería ser fácil para ser utilizado (visualmente intuitivo) por el personal regular de la administración de la plantación con sólo experiencia/conocimientos básicos sobre la operación de una plantación.

La primera restricción implicó que sólo las siguientes variables se podrían utilizar:

- *Identificación del BLOQUE:* División, Bloque, Área, Cultivo, Variedad, Año de Siembra, Población de plantas.

El sistema de software PAXSYS se ha diseñado y construido para representar información de la plantación en forma temporal así como espacial.

- *Información Física del Suelo:* Pendiente, Textura, capacidad de Infiltración y clase de Color (para cada bloque) - la información es estática - es decir, se recopila sólo una vez (aun costo mínimo).

- *Información Química del Suelo:* pH, P disponible, Intercambio de K, Ca y Mg, etc. La información es temporal - es decir, se recopila anualmente (o una vez cada varios años) durante los muestreos de suelo y foliar.

- *Información sobre el Crecimiento:* Circunferencia y Altura, parámetros de índice del Área Foliar (LAI), Ancho del Folíolo, Longitud del Folíolo, Longitud de la Hoja (de la Hoja 9/17 para la siembra de cada bloque) - la información es temporal - es decir, se recopila anualmente durante los muestreos de suelo y foliar).

Estado Nutricional de la Siembra: valores analíticos foliares de la Hoja 9/17; N, P, K, Mg, etc. - la información es temporal - es decir, se recopila anualmente durante los muestreos de suelo y foliar.

Información de Producción: Producción Total de Racimos de Fruta Fresca (RFF), Número Total de RFF, Peso Promedio del Racimo y Número promedio de Racimos (por bloque o por hectárea) para cada bloque en todas las Divisiones - la información es temporal - es decir, se recopila mensualmente.

- *Información Climática/Precipitación:* la Precipitación Mensual y los días de lluvia para cada División - la información es temporal - es decir, se recopila mensualmente para cada división.
- *Información de precios:* Precios de RFF en plantación, Aceite de Palma Crudo y Palmiste y precio de fertilizantes entregados en la hacienda y tarifas de salarios por mano de obra - la información es temporal - es decir, se recopila mensualmente.
- *Detalles Operacionales / Costos:* Número de Rondas de Deshierbe, Plagas y Enfermedades, Transporte de RFF, etc. - sus costos de Mano de Obra más Materiales y costos fijos - la información es temporal - es decir, se recopila mensualmente y en orden de preferencia a nivel de bloque, de división/año de siembra y/o a nivel de finca.

La segunda restricción implicó que el resultado presentado al usuario de cualesquiera operaciones de examen o análisis de datos que deban ser hechos por el computador, no debe ser demasiado técnico, pero a la vez debe ser muy útil - es decir, los datos no elaborados deben ser transformados en datos utilizables para la toma de decisiones. Así, todos los detalles operacionales de los diferentes módulos de PAXSYS tuvieron que ser integrados perfectamente y ser transparentes visualmente para el usuario final.

Por lo tanto, todos los módulos de software que se describen a continuación y que conforman el sistema PAXSYS están contruidos para cumplir con las restricciones mencionadas arriba, de forma que PAXSYS pueda ser operado fácilmente en un ambiente de plantación comercial, sin requerir cambios significativos (y costosos) a los sistemas operacionales existentes. Las dependencias arquitectónicas de los módulos de PAXSYS aparecen en la Tabla 1.

El módulo PAX*Núcleo provee el fundamento o capa base del sistema PAXSYS como un todo, ya que las

estructuras de sus datos fueron diseñadas para representar características del suelo no temporales hasta el nivel de bloque (Área, Cultivo, Variedad, Año de Siembra, Población de plantas y Pendiente del suelo, Textura, Capacidad de Infiltración y Clase de Color, etc.). El subsistema para trazar mapas, PAX*Trazador de Mapas, reside al lado de PAX*Núcleo para representar datos especialmente o para responder preguntas formuladas por usuarios del sistema con una dimensión en el aspecto espacial.

Los módulos de las capas primarias, PAX*Agro, PAX*Producción y PAX*Finanzas, yacen encima de PAX*Núcleo para absorber y mantener todos los datos temporales - es decir, agronómicos, de producción y financieros, así como datos operacionales de la plantación y para permitir un análisis interactivo directo.

PAX*Agro hace posible que el usuario vea todos los datos agronómicos y agroclimáticos que hayan sido ingresados en el sistema. La vista de estos datos se hace con base en que el usuario seleccione la información específica requerida - y el sistema muestra los datos solicitados en forma significativa, utilizando tablas, gráficos/cuadros, etc.

PAX*Producción hace posible que el usuario vea todos los aspectos de la producción de la plantación y la información relacionada con el rendimiento, donde dicha visión (tabular o gráfica) puede ser con base en la finca, la División o el Bloque, o con base en el Año de Siembra. La vista de los datos de rendimiento también se puede hacer con base en que el usuario seleccione los criterios que se tienen que cumplir (tales como: por año de siembra, textura del suelo/inclinación, etc.).

PAX*Finanzas, el cual rastrea y resume los datos financieros de la plantación repetida y eficientemente, también puede realizar análisis poderosos de un resumen de eventos futuros de "Qué sucedería si..." Por ejemplo: si se espera que la tasa de salarios por mano de obra se va a elevar un 5% en el año que viene, la administración

puede determinar casi instantáneamente sus implicaciones sobre el balance del año a la fecha y otras medidas de rentabilidad. (Se debe anotar que la arquitectura de PAX*Finanzas simula fielmente las operaciones financieras que se llevan a cabo en una plantación y que pueden ser convertidas

Tabla 1. Dependencias Arquitectónicas de los Módulos de Software de PAXSYS

Capa	Módulo de PAXSYS			
<i>Secundaria:</i>			PAX*Negocio Inteligente	PAX*Consejero
	PAX*Fertilizante Recomendado	PAX*Uso de Mano de Obra	PAX*Pronóstico de Rendimiento	PAX*Simulador
<i>Primaria:</i>	PAX*Agro	PAX*Agua	PAX*Producción	PAX*Finanzas
<i>Básica:</i>	PAX*Núcleo y PAX* Trazador de Mapas			

fácilmente en sistema de contabilidad de la plantación que registre transacciones diariamente).

En la capa secundaria se encuentra todo el análisis de datos obtenidos y los motores de interpretación que optimizan el uso de entradas - por ejemplo, fertilizantes y mano de obra, generan un pronóstico mensual de las cosechas 12 meses hacia delante (con base en bloques), simula repuestas a criterios definidos por los usuarios (análisis de QUÉ SUCEDERÍA SI...), etc. Los siguientes módulos de capa secundaria llevan a cabo los papeles de arriba:

PAX*Agua
PAX*Pronóstico del Cultivo
PAX*Uso de la Mano de Obra
PAX*Fertilizante Recomendado
PAX*Simulador
PAX*Negocio Inteligente
PAX*Consultor

PAX* Agua es un modelo hidrológico que genera cálculos mensuales de las reservas de agua del suelo en cada bloque, con base en la identidad de reserva de agua del suelo (SWR).

Reserva de Agua del Suelo (SWR) t =
Reserva de Agua del Suelo (SWR) $t-1$ +
PRECIPITACIÓN t + IRRIGACIÓN t

ESCORRENTIA t - LIXIVIACIÓN t
EVAPORACIÓN t - TRANSPIRACIÓN t

Tales cálculos de reserva de agua del suelo (SWR) se requieren para ser alimentados al PAX*Pronóstico del Rendimiento, junto con el crecimiento de la palma y la información nutricional de PAX*Agro para generar los pronósticos mensuales de rendimiento para los próximos 12 meses para cada bloque por medio del Modelo de Función de Producción (que se detallará más adelante en este artículo).

PAX*Pronóstico del Rendimiento genera, mediante un modelo de función de producción de palma de aceite, pronósticos de rendimiento hasta de 12 meses hacia delante para cada bloque y luego resumiendo a niveles de año de siembra, división o finca. Los conceptos utilizados para realizar esto se discutirán más adelante en este trabajo. Se espera que esto sea útil para propósitos de mercadeo cuando el PAX*Negocio Inteligente se vuelva operacional.

PAX Pronóstico
del Rendimiento
genera, mediante
un modelo de
función de
producción de
palma de aceite,
pronósticos de
rendimiento hasta
de 12 meses.*

PAX*Mano de Obra acepta información para la iniciación entregada por la administración de la plantación sobre restricciones laborales, la bolsa común de mano de obra de varios tipos (cosechadores, desyerbadores, etc.) su productividad individual (bajo varias combinaciones de edad de siembra - pendiente), etc. Luego, él determina la utilización óptima de la mano de obra con respecto a cuándo se utiliza dicha mano de obra, cuánta se utiliza y dónde ha de ser utilizada. El módulo tiene incorporada inteligencia agronómica y sobre administración de la plantación que permite que la máxima cantidad de los diferentes tipos de actividades laborales sea computada con base en varias particularidades agro-climáticas y del cultivo y las diferentes condiciones del campo, como para perfeccionar el patrón de uso de la mano de obra en las plantaciones y la distribución del área a lo largo del tiempo y las temporadas de precipitación/cosecha.

En vista de que el 90% del potencial de la fuerza laboral se utiliza en la cosecha de RFF, PAX*Mano de Obra trabaja conjuntamente con PAX* Pronóstico de Rendimiento para optimizar el uso de la mano de obra de cosecha. La mano de obra inactiva luego se asigna a otros trabajos en base a una priorización - es decir, cada recurso de trabajadores debe

ser asignado al bloque más necesitado, desde el punto de vista de tener la mejor posibilidad de generar un aumento en las ganancias/ minimizar los costos. Como ejemplo: el sistema rastrearía los patrones de precipitación en la plantación durante los últimos años y decidiría en cuáles meses del próximo año se deberían llevar a cabo las operaciones de desyerbe, el número de desyerbadores requeridos y, utilizando información sobre el bloque de condiciones de malezas, decidiría cuáles bloques necesitan cuántos días-hombre de desyerbadores. Conjuntamente con PAX*Agua, el software tendrá la inteligencia de saber que en los meses secos, la reserva de agua del suelo es baja y, como tal, el crecimiento de la malezas se reduciría. Por lo tanto, si las condiciones de maleza en el campo no son muy malas, sería económicamente ineficaz asignar mano de obra para desyerbar este bloque en particular, en este momento en particular y, por lo tanto, el sistema lo impide.

El módulo PAX*Fertilizante Recomendado es capaz de interpretar y analizar, junto con PAX*Agro, todos los

datos agronómicos y nutricionales de las plantas y del suelo para generar recomendaciones sobre fertilizantes para cada bloque. Este módulo realiza "Fertilización de Reemplazo / Mantenimiento" (utilizando el concepto de balance nutritivo) para reemplazar nutrientes exportados en RFF cosechados y para hacer ajustes correctivos para mejorar / corregir el estado nutricional de la palma (según se valora por el análisis foliar). También se hacen ajustes para la textura del suelo y las clases de pendiente de los bloques para responder por las reservas del suelo naturales / construidas, así como pérdidas por lixiviación y escurrimiento de nutrientes / fertilizantes solubles. El módulo está diseñado para efectuar también una acumulación progresiva de reservas de nutrientes del suelo en suelos cuya capacidad de mantener nutrientes permite una acumulación progresiva de reservas de nutrientes (hasta niveles "seguros" o deseables). Minimiza la aplicación de fertilizantes solubles (costosos!) en cualquier aplicación si la capacidad del suelo para retener los nutrientes (es decir, capacidad de intercambio de catión) es baja. También tiene la capacidad computacional de mezclar e igualar fertilizantes sin mezcla ver sus fertilizantes compuestos.

Nota: el módulo de PAX*Fertilizante Recomendado, junto con PAX*Agro, en realidad fueron desarrollados hace cinco años como un programa interno independiente para generar recomendaciones sobre fertilizantes para las plantaciones de clientes de ARAB que cubrían más de 250.000 hectáreas y que incluían una gama muy diversa de suelos y condiciones climáticas en Malasia (Península y Sabah/Sarawak), Sumatra y Kalimantan en Indonesia. A lo largo de los años, el programa ha sufrido modificaciones / refinamientos incrementales y ahora está bastante estable. Estos módulos fueron llevados a PAXSYS como un componente principal del software. También se debe anotar que en vista de que los costos de fertilizantes y mano de obra representan más del 60% de los costos de producción de la palma de aceite en el campo, se le dio gran prioridad a la optimización del uso de estos insumos en el desarrollo de PAXSYS.

PAX*Simulador utiliza los cálculos de coeficiente del modelo de función de producción generados internamente por los algoritmos de PAX*Pronóstico de Rendimiento para permitir al usuario realizar experimentos de entrada-salida, es decir, análisis de tipo "¿qué

sucedría si..?" Por ejemplo, el usuario puede simular períodos de sequía y examinar / cuantificar el efecto sobre el rendimiento.

PAX*Consejero representa un código de software basado en reglas, que incorpora lógica y actos agronómicos como una versión de computador / robot de un agrónomo, excepto que está equipado con la capacidad computacional de realizar análisis estadísticos para confirmar / validar conclusiones basadas en datos mantenidos en bases de datos de PAXSYS. El "Consejero de la Plantación" está diseñado para revisar cada bloque de una plantación e identificar áreas problemáticas mediante la aplicación de condiciones de reglas / búsqueda, identificando posibles problemas y luego sugiriendo posibles soluciones.

PAXSYS - Especificaciones del Diseño de Ingeniería

Todos los módulos de PAXSYS fueron desarrollados en el ambiente de computación de sistema operacional de 32 bits de Windows 95 y Windows NT. Esto permite el acceso rápido a los datos del sistema y el análisis de las inmensas cantidades de datos que las plantaciones necesitan mantener en la base de datos para hacer los tipos de análisis de serie de tiempo. El código de origen se escribió en un lenguaje de programación orientado hacia el objeto para permitir tiempos de desarrollo rápidos (mediante el uso repetido eficiente del código) y permitiendo modificaciones rápidas de software sin rebajar un sistema en operación/vivo. También fue diseñado para ser integrado con el trabajo en redes estándar de infraestructura/protocolos proporcionados por los principales sistemas operacionales comerciales de forma que puedan funcionar a través de Redes del Área Local, así como una Red de Área Amplia (aprovechando facilidades de Acceso Remoto de Windows 95/NT e Internet). Esto es bastante esencial para el sector de plantaciones, si se va a comparar la información de una plantación o finca con la información de otra plantación o finca, o si la oficina central va a tener acceso "en vivo" a los datos de la plantación para realizar exámenes o análisis de datos directamente.

Las bases de datos PAXSYS fueron estructuradas y diseñadas para permitir resúmenes y comparaciones de

***PAX* Consejero
representa un
código de
software basado
en reglas, que
incorpora lógica
y actos
agronómicos
como una versión
de computador.***

datos de bloque-en-bloque, de división-en-división y de finca en finca y las interfaces de usuarios fueron equipadas con estructuras de filtración para aceptar averiguaciones múltiples y variadas de los usuarios. Las rutinas de software desarrolladas incluyen la inserción de datos inteligentes y guías de validación, un almacenamiento inteligente de datos y motor de recuperación, así como un sub-sistema versátil de reportaje e impresión. Adicionalmente, un motor dinámico, analítico de averiguación/búsqueda, subsistemas dinámicos para elaborar gráficas y trazar mapas y rutinas estadísticas (promedios ponderados del área, máximos, mínimos, medición de errores, análisis de correlación estadística, etc.) han sido incorporadas. La Interfaz Gráfica del Usuario del sistema se hizo especialmente intuitiva y se equipó con características de edición fáciles de utilizar. Características de Windows OLE Estándar (Vinculación e Incrustación del Objeto) y de DDE (Motor Dinámico de Datos) permiten que los datos sean actualizados automáticamente e insertados en informes preparados por la administración en procesadores de palabra y planillas de cálculo capacitados con OLE/ DDE, etc.

B. Formulación del Modelo de Función de Producción de Palma de Aceite (PAX Pronóstico de Rendimiento).

El rendimiento de la palma de aceite está relacionado fisiológicamente con su crecimiento en el pasado, la cantidad de tejido fotosintético que tiene, el estado nutritivo de las palmas y el agua que tiene disponible. Aunque necesita energía solar para conducir el proceso fotosintético, este recurso natural con frecuencia no es medido regularmente por las plantaciones y los autores no piensan que sea un factor principal limitante en la mayoría de las áreas tropicales donde generalmente se cultiva la palma de aceite (y no se incluye como variable en el modelo).

Como tal, las variables operacionales y sus relaciones que definen el rendimiento de la palma de aceite serían las siguientes:

$\text{Rendimiento} = f(\text{Crecimiento}, \text{índice del Área de la Hoja (LAI)}, \text{Total Nutriente}, \text{Reserva de Agua del Suelo (SWR)} \text{ t}) \text{ PAX} \cdot \text{Pronóstico de Rendimiento}.$

$\text{Crecimiento} = f(\text{Circunferencia}, \text{Altura}, \text{índice del Área Foliar (LAI)}) \text{ PAX} \cdot \text{Agro}.$

$\text{índice del Área Foliar (LAI)} = f(\text{Ancho de Folíolo} \times \text{Longitud de Folíolo} \times \text{Longitud de la Hoja} \times \text{Número de Hojas} \times \text{Población de palmas}) \text{ PAX} \cdot \text{Agro}.$

$\text{Estado Total de Nutrientes} = f(\text{N} + \text{P} + \text{K} + \text{Ca} + \text{Mg}) \text{ PAX} \cdot \text{Fertilizante Recomendado}$

$\text{Reserva de Agua del Suelo (SWR)} \text{ t} = \text{Reserva de Agua del Suelo (SWR)} \text{ t}_{-1} + \text{Precipitación (RF)} \text{ t} + \text{IRRIGACIÓN (IRRI)} \text{ t} - \text{ESCORRENTÍA t} - \text{LIXIVIACIÓN t} - \text{PAX} \cdot \text{Agua} - \text{EVAPORACIÓN t} - \text{TRANSPIRACIÓN t}$

En donde,

SWR	= Reservas de Agua del Suelo
RF	= Precipitación
IRRI	= Irrigación
RUNOFF	= Escorrentía
EVAP	= Evaporación
TRANS	= Transpiración
LAI	= índice del Área Foliar

El modelo de flujo de datos y análisis para el sistema de pronóstico de rendimiento se puede representar en un diagrama.

Sin embargo, se debe anotar que los procesos fisiológicos toman tiempo - se necesita tiempo para que la sacarosa producida mediante la fotosíntesis en los tejidos foliares se fabrique, para que luego se mueva para desarrollar yemas florales femeninas y luego para que las yemas maduren para formar un racimo maduro de fruta fresca - estos procesos pueden tardar un total de 3 años o más. Cualesquiera choques drásticos que

ocurran a las variables mencionadas arriba durante este período se espera que impactarán sobre los rendimientos y la acumulación neta de carbohidrato de las palmas en general, es decir, fotosíntesis menos respiración, o el neto de la acumulación de carbohidrato menos la descomposición de los carbohidratos.

Existe suficiente evidencia para indicar que la disponibilidad de agua del suelo para las palmas es una variable principal en el proceso de formación de RFF -

y que su influencia en los RFF cosechados hoy, puede retroceder hasta tres años. (Caliman 1992; Chan et al. 1985). El primero utilizó herramientas de regresión, mientras que el último realizó un análisis ARIMA de la producción de la palma de aceite. Nuestros propios análisis preliminares de patrones de precipitación y tendencias de rendimientos también apoyan el papel de "factor limitante" que juega el agua del suelo.

También existe suficiente evidencia de numerosas Pruebas de Fertilización (Foster et al. 1985 y otros) y el análisis de nuestras propias bases de datos donde se mantienen registros agro-técnicos y de producción de las plantaciones de clientes, de que la nutrición afecta el crecimiento (circunferencia en la base de la corona, altura, índice del área foliar) y el rendimiento.

Por lo tanto, cualquier formulación de un modelo de función de producción de una cosecha de palma de aceite tendría que relacionar todas las variables en las ecuaciones de arriba, con el tiempo. Esto incluye el rendimiento en sí.

Siempre y cuando la evidencia empírica indica que existe una fuerte relación entre Precipitación (RF) / Reservas de Agua del Suelo (SWR) dentro de un período de tres años, antes de la cosecha mensual, y que existe una cantidad considerable de fluctuación / variabilidad en sus valores, ésta debe ser la fuente primaria de la variabilidad de los altos rendimientos que se ven de un año al siguiente en palmas en la misma población. Diferencias en rendimientos entre poblaciones/bloques de palmas en el mismo año son probables debido a sus diferencias fisiológicas y de crecimiento (su circunferencia y altura), su índice del Área Foliar (LAI) y su estado nutricional, etc.

Sin embargo, los parámetros de crecimiento, de índice del Área Foliar (LAI) y nutrientes, por lo general, no sufren cambios drásticos que puedan impactar los rendimientos significativamente dentro de un corto período de tiempo. Por lo tanto, como un primer paso, sería necesario modelar el efecto de la Reserva de Agua del Suelo (SWR) en cualquier punto, o en múltiples puntos en el tiempo, sobre la producción de RFF en un mes en particular. (Los principios utilizados por el modelo que computa mensualmente la

Reserva de Agua del Suelo (SWR) se describen brevemente en el Apéndice 1).

Al usar análisis de correlación, es decir, al probar la correlación de la Reserva de Agua del Suelo (SWR) al mes $t-m$ con el rendimiento al mes t , se determinó que los rendimientos de RFF en cualquier mes, t es sensible a las Reservas de Agua del Suelo (SWR), 12, 24, y 36 meses anteriores. Sin embargo, hubo correlaciones secundarias detectadas a intervalos de 6 meses -18 y 30 meses antes del mes de cosecha.

Esto parece ser bastante consistente con los estudios de Corley (1976) quien identificó las secuencias/etapas de tiempo en la producción de una inflorescencia de palma de aceite y que han sido relacionadas con la duración de las etapas de hojas entre eventos en el desarrollo de las inflorescencias.

Por lo tanto, se puede determinar la variabilidad del rendimiento debida a la variación en el agua del suelo. Sin embargo, los rendimientos también se determinan por parámetros de Crecimiento, el índice de Área Foliar (LAI) y Nutrición, pero la variabilidad en el rendimiento como resultado de estos factores se explican fácilmente autoregresivamente.

Las tendencias/variabilidad del rendimiento que resultan de cambios en la madurez de las palmas (es decir, el factor de la interacción edad/densidad de siembra) se explican al utilizar un algoritmo promedio, en movimiento, ponderado y no lineal de la edad/densidad de siembra. Esto es posible porque se está tratando con un cultivo perenne donde la variabilidad de año en año es pequeña y no linealmente incremental en naturaleza.

Después de la construcción de la serie apropiada de ecuaciones modelos para responder por las diferentes causas de variabilidad del rendimiento, se utilizaron datos en un bloque de rendimiento de un caso de

Tabla 2. Secuencia de tiempo en la iniciación de inflorescencia para la cosecha de racimos de fruta fresca

Etapas en el Desarrollo de la Inflorescencia en la Palma de Aceite	Duración (meses)	Meses antes de la cosecha $t-?$
Iniciación de la Inflorescencia	12	$t-36$
Diferenciación de sexo	6	$t-24$
Iniciación de Espiguilla	6	$t-18$
Diferenciación de Espiguilla	6	$t-12$
Antesis (aborto)	6	$t-6$
Total de meses antes de la cosecha>	36	$t-0$
		(en el momento de la cosecha)

Nota: se produce 1 hoja cada 2 semanas (0,5 meses)

estudio de una plantación de 10.000 hectáreas para probar la hipótesis de arriba. Se pudo proyectar, con algún grado de exactitud para la plantación del caso de estudio, rendimientos mensuales para 12 meses hacia el futuro a nivel de bloque.

C. Validación Preliminar del Modelo de Función de la Producción de Palma de Aceite

Al validar el modelo de función de producción para palma de aceite, se computaron / pronosticaron los rendimientos de un año hacia el futuro (es decir, para 1994), utilizando datos de 1991 -1993 introducidos en PAXSYS y procesándolos por medio del modelo.

El caso de estudio de la plantación de 10.000 hectáreas al norte de Sumatra tuvo bloques/divisiones con un terreno desde muy plano hasta muy pendiente y una variación significativa en sus patrones de precipitación a través de las divisiones. Sin embargo, la textura del suelo fue muy uniforme.

El pronóstico se hizo para cada uno de los más de 300 bloques (en 12 divisiones) - con un promedio de 25 a 35 hectáreas por bloque en la plantación del caso de estudio/proyecto piloto. Los rendimientos pronosticados luego se compararon con los rendimientos reales registrados por la plantación para todos los bloques para 1994.

Para una gran mayoría de los bloques, el pronóstico y los rendimientos reales registrados para 1994 resultaron bastante exactos. Sin embargo, para muchos bloques con un tamaño menor de 15 hectáreas, la exactitud sufrió y se hizo más inexacta para bloques menores de 10 hectáreas. Esta discrepancia fue investigada y se descubrió que se debía a los RFF "se cruzaban de un bloque al siguiente" cuando el tamaño de la asignación de la labor de los cosechadores cubría más de un bloque - es decir, que hubo cierta contaminación en el rendimiento. En dichos casos, los bloques vecinos (a no ser que su tamaño fuera relativamente grande) también mostraron poca exactitud en el pronóstico.

Cuando se resumieron los pronósticos de los rendimientos en divisiones enteras, la exactitud del rendimiento mensual fue muy buena y el rendimiento

acumulado para 12 meses entre el pronosticado y el obtenido realmente y registrado cumulativamente se diferenció por un promedio del 5%.

Se debe admitir que todavía no se ha probado el modelo detalladamente en un gran número de plantaciones bajo diversas condiciones climáticas, y que se necesita mucho tiempo para ingresar a datos de cinco años sobre la plantación a nivel de bloques, antes de que se pueda realizar tal prueba de exactitud a nivel de bloques. Sin embargo, se cree que la lógica utilizada debería ser aplicable para la mayoría de las situaciones (posiblemente con más refinamientos/menores modificaciones) - pero esto se tendrá que realizar con el tiempo. Las pruebas preliminares utilizando datos del nivel año de siembra se ingresaron en el sistema de plantaciones situadas en el norte de Sumatra, el sur de Sumatra y el oeste de Malasia, indican que el algoritmo de pronóstico de rendimiento fue capaz de captar las tendencias generales de rendimiento y los momentos de cambio muy satisfactoriamente.

Nota:

El modelo completo de la función de producción de palma de aceite que ha sido definido aquí y probado, es básicamente un modelo modificado de serie de tiempo - un modelo promedio autorregresivo, integrado y en movimiento (ARIMA) con factores de casualidad introducidos dentro del mismo para

responder por las variables conductoras o exógenas, es decir, reserva de agua del suelo y el estado de crecimiento y nutrición de las plantas.

Ninguno de los procesos fisiológicos y de crecimiento han sido modelados explícitamente, pero se ha respondido por ellos implícitamente en el componente autorregresivo como una variable planteada - es decir, como una constante o como un parámetro que cambia a una tasa en particular que es constante. Como tal, no es posible pronosticar tasas de crecimiento, acumulación de una materia seca, etc. utilizando el modelo de arriba - igual que los modelos construidos por Gerritsma (1998) y Van Kraalingen et al. (1989) intentan hacer y que han logrado algún grado de éxito. Sin embargo, Gerritsma y Van Kraalingen hasta ahora no han dividido en factores cómo las reservas de agua del suelo (una causa muy

El modelo de la función de producción de palma de aceite es básicamente un modelo modificado de serie de tiempo.

importante de la variabilidad del rendimiento) y la nutrición actúan de maneras exógena, como se ha hecho. Además, sus modelos requieren datos de entrada que no se mantienen normalmente en las plantaciones comerciales o que se puede recopilar económicamente y/o sin métodos de muestreo que no sean demasiado destructivos.

Sin embargo, se debe anotar que un modelo biológicamente más "exacto", tal como los intentados por Gerritsma y van Kraalingen, tiene la ventaja de contar con el potencial de generar pronósticos a plazo más largo razonablemente exactos, si el agua del suelo y la nutrición y otras variables exógenas están bien modeladas. Sin embargo, todavía existen muchas brechas en el conocimiento sobre la fisiología de las plantas/ palmas de aceite (sobre cómo el agua y los alimentos interactúan con la bioquímica de las plantas y el medio ambiente) para lograr el nivel deseado de exactitud en los pronósticos de crecimiento y de rendimiento que utilizan tales modelos "biólogicamente perfectos". Por lo tanto, se tuvo que recurrir a un modelo empírico que responde por el crecimiento y la fisiología de las palmas autorregresivamente/de manera exógena, pero que también permite modelar el efecto de las entradas del campo, las reservas de agua del suelo y, hasta cierto punto, la nutrición de la planta de manera exógena

D. Formulación del Sistema de Recomendación de Fertilizantes para la Palma de Aceite (PAX Fertilizante Recomendado/Palma de Aceite)

El Sistema de Recomendación de Fertilizantes para la Palma de Aceite fue diseñado por ARAB para generar recomendaciones de fertilizantes para siembras de palma de aceite de varias edades y niveles de rendimiento, que muestren tasas de crecimiento variables y que tengan estados nutricionales variables y que crezcan en suelos

con características físicas y reservas nutricionales variables.

Al generar dichas recomendaciones, el sistema utiliza el concepto de balance de nutrientes del cultivo (Tabla 3).

Procesalmente, el Sistema de Recomendación de Fertilizantes (FRS) hace lo siguiente para cada macronutriente de la planta (N, P, K, Ca, Mg y S):

- Examina el medio ambiente físico de la siembra - textura del suelo, color, pendiente, capacidad de infiltrado, terreno, etc.
- Examina las reservas de nutrientes en el suelo (resultados de los análisis del suelo).
- Calcula la edad de siembra (con base en el año de siembra).
- Computa una tasa de Fertilizante Básico (con base en resultados de investigaciones pasadas sobre las tasas de uso de nutrientes en varias edades del cultivo de palma de aceite).
- Examina las medidas de crecimiento del cultivo (Circunferencia e índice del Área Foliar [LAI]) y los niveles de rendimiento para calcular la inmovilización de los nutrientes y los niveles de exportación de nutrientes.
- Examina el estado de nutrición de la palma (resultados de análisis foliares).
- Ajusta la tasa de Fertilizante Básico para responder por el crecimiento bueno/regular de la palma y el estado nutricional.

Tabla 3. Concepto de Balance de Nutrientes

Disponibilidad de Nutrientes		Uso/ Desperdicio de nutrientes	
Natural	Nuevo abastecimiento	Uso	Desperdicio
Reservas de nutrientes inherentes al suelo	Fertilizantes	Inmovilizados en la palma	Escurritia y lixiviación
Reciclaje de nutrientes		Utilizado para el crecimiento y la producción (exportado)	Erosión del suelo superficial rico en nutrientes
Calculado mediante el Análisis de suelos	Computarizado por el Sistema de Fertilizantes Recomendados	Calculado por Análisis Foliar y la medida de Crecimiento / Rendimiento	Calculados con base en características físicas y químicas del suelo

Después de que el procedimiento anotado arriba se haya repetido para todos los micronutrientes individuales, el sistema:

- Computa las proporciones de balance de nutrientes para identificar el (los) factor(es) primario(s) limitante(s) de nutrientes.
- Examina los parámetros económicos (precios de fertilizantes y de los RFF).
- Anota los tipos de fertilizantes a ser aplicados (fuertes de nutrientes).
- Computa una tasa de recomendación de fertilizante (Fertilizante Recomendado) para diferentes fertilizantes a ser aplicados en combinación y en el momento oportuno/secuencia de aplicación.
- Ajusta este Fertilizante Recomendado según las propiedades de los tipos del fertilizante individual (es decir, soluble vs. parcialmente soluble). Hace esto calculando también las pérdidas por escorrentía y lixiviación de los diferentes tipos de fertilizantes cuando se aplican al bloque, cuyas propiedades de textura y pendiente del suelo son conocidas por el sistema.

Nota:

El sistema ha sido ajustado para optimizar el estado nutricional de las palmas de tal manera que no se limite la producción (tanto a corto como a largo plazo) - y hacerlo a un costo mínimo.

Al sistema se le ha "enseñado" a identificar suelos con características específicas identificables - tales como los suelos volcánicos, derivados de turbas y ultrabásicos (por ejemplo, serpentina). Así, los efectos de la interacción de nutrientes se pueden mitigar, por ejemplo, contra los suelos volcánicos, ricos en bases y se puede evitar la aplicación inútil de fertilizantes a base de magnesio en suelos de turba.

E. Formulación de Programas de Optimización del Uso de la Mano de Obra (PAX Mano de Obra)

Al utilizar los pronósticos de rendimiento generado por PAX*Pronóstico de Rendimiento para cada bloque, el PAX*Mano de Obra computa la distribución (a nivel de bloque) de la mano de obra de la plantación/cosecha

para cada uno de los 12 meses para los cuales los rendimientos han sido pronosticados. Esto se hace después de que el usuario/administrador de la plantación especifique la cantidad total de los varios tipos de mano de obra disponibles en la plantación, las tasas de productividad de los cosechadores para las siembras de palmas de aceite de varias edades/altura de palma sembradas en varias clases de pendientes/clase de terrenos.

PAX*Mano de Obra también tiene la capacidad proveer para el sistema de cosechas asistidas - por los cuales los usuarios pueden, con base en estudios de movimiento en el tiempo - ingresar las proporciones apropiadas de productividad de la mano de obra en el PAX* Mano de Obra para el sistema específico de cosecha. Esto permitiría a aquellos administradores de plantación que contemplan el uso óptimo de las diferentes combinaciones de sistemas de cosecha asistidos/mecánicos, medir cualesquiera ganancias potenciales de productividad bajo sus condiciones operacionales individuales.

DISCUSIÓN

Ahora que se tiene un modelo de producción funcional de palma de aceite (que se espera compruebe ser confiable a gran escala), se le puede utilizar (o alguna variable del mismo) para tomar decisiones sobre insumos (mano de obra, fertilizantes, agua) y ver qué impacto tiene sobre el producto total - rendimiento. De esta forma, se puede realizar un análisis de costo-beneficio sobre cualquier decisión sobre los insumos principales.

Desde la perspectiva de la administración, es bastante tedioso que continuamente, mes tras mes y a lo largo de inmensas áreas (es decir, grandes volúmenes de datos), primero recopilar, luego comparar, luego analizar y finalmente tomar decisiones, hacer juicios e inversiones. Tomar estos pasos manualmente es laborioso, consume tiempo y probablemente no resulta comprensible. El costo asociado con no poder tomar decisiones sólidas, rápidas, integradas y comprensibles, con frecuencia puede ser muy alto.

Por lo tanto, todos los módulos del sistema PAXSYS están integrados transparentemente y se hacen disponibles simultáneamente a todos los usuarios potenciales a través de un sistema de redes para que ellos se beneficien de datos continuamente actualizados sobre las operaciones de las plantaciones. El sistema va más allá de la simple presentación de datos, filtrando y

analizando también datos sin elaborar para presentar información bien definida a la administración para la toma de decisiones más rápidas y racional.

Es posible la disponibilidad simultánea de datos para todos los usuarios potenciales a través de un sistema de redes, aun cuando los datos ingresados al sistema vengan de múltiples plantaciones situadas cientos de kilómetros las unas de las otras.

Por lo tanto, los controladores/auditores financieros pueden tener acceso al sistema para determinar los aspectos financieros de las operaciones de una plantación (o de múltiples plantaciones), para ver si las solicitudes de gastos deben ser aprobadas con base en cualesquiera criterios/cuestiones que escojan seguir o proponer al sistema. Los presupuestos operacionales para el siguiente año financiero también se pueden preparar mucho más rápido. En vista de que los pronósticos de rendimiento pueden ser generados por el sistema, el personal de mercadotecnia puede negociar en el mercado de futuros con más confianza cuando intenta obtener una prima por su aceite de palma crudo (o reducir las sanciones comerciales).

El agrónomo puede examinar en el sistema todos los datos agronómicos y climáticos de la plantación (ya sea en forma no elaborada o derivada) y puede realizar una revisión de nutrientes de las siembras y las reservas de nutrientes del suelo de la plantación. Las tasas de crecimiento de las palmas y los rendimientos se pueden examinar de múltiples formas. Las recomendaciones de fertilizantes pueden ser generadas automáticamente del análisis de todos los datos mantenidos a nivel de bloque. Se puede llevar a cabo análisis de resúmenes de posibles eventos futuros de "¿Qué sucedería si...?" para calcular impactos de insumos de agua de lluvia/irrigación, fertilizante utilizado, etc.

Los administradores a nivel del campo pueden planificar y llevar a cabo eficazmente las operaciones logísticas con base en los datos rastreados y analizados automáticamente por el sistema, con sujeción a los criterios definidos por la administración. Por ejemplo, los planes de perfeccionamiento del uso de la mano de obra se pueden preparar rápidamente con mucha anticipación al uso en sí. Se pueden evaluar rápidamente las tasas de dosis óptimas para los fertilizantes y presupuestarlas.

Un beneficio significativo se deriva del hecho de que todas las categorías del personal administrativo

mentionado arriba tienen acceso a la misma base de datos básica que cuando los datos son corrientes, y juntos pueden llegar a conclusiones/decisiones casi inmediatamente. Por lo tanto, ahora se puede lograr mucho mejor la coordinación entre todas las personas que toman decisiones.

Los datos se pueden ingresar al sistema desde múltiple lugares (es decir, desde distintos países, diferentes plantaciones o diferentes divisiones dentro de una plantación, etc.) y al mismo tiempo se pueden generar resúmenes financieros/de producción rápidamente a lo largo de toda la compañía con base en tiempo casi real. Se debe anotar que los protocolos de trabajo en las redes y el envío de datos programados dentro del sistema, permite que los datos sean trasladados, por ejemplo, desde las diferentes oficinas de división de la plantación a la oficina principal de la plantación y posteriormente hacia delante a las oficinas centrales de la compañía (que quizás estén situadas en otro país), a través de Internet. Por lo tanto, todos los datos de la plantación están disponibles para todo el personal autorizado, a todo momento. Alternativamente, se puede hacer el traslado manual de datos (a intervalos mensuales).

CONCLUSIÓN

Este ensayo ha evitado intencionalmente entrar en detalles sobre modelaje, formulaciones de ecuaciones, etc., es decir, los aspectos agrotécnicos de "tuercas y tornillos" del PAXSYS. Su propósito era ilustrar sobre lo que se puede lograr cuando sólo datos básicos de campo mantenidos por las plantaciones/agrónomos son utilizados por un sistema como el PAXSYS para beneficio de la administración de las plantaciones de palma de aceite.

Aunque técnicamente el PAXSYS es un sistema complejo (con ecuaciones/modelos complejos de serie de tiempo), es fácil de usar. Todos los modelos técnicos complejos y los conceptos de búsqueda están "debajo de la capota"- un usuario puede operar/utilizar el sistema en un ambiente de plantación comercial con un mínimo de tiempo de entrenamiento y con un mínimo de comprensión de los principios técnicos - aunque él/ella debe contar con algunos conceptos básicos de la agronomía/ciencia de los suelos y operaciones de la plantación. En el futuro se espera añadir varios otros módulos de software analíticos/lógicos al PAXSYS con base en nuestra propia experiencia y en la realimentación de plantaciones que utilizan el sistema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer las contribuciones sobre investigación y conocimientos hechas por numerosos científicos en áreas tales como la respuesta de la palma de aceite al abonamiento y al agua, y a todos aquellos que han contribuido al conocimiento utilizado, bien en su forma original o modificado, en la operación del módulo de función de producción referido brevemente en este artículo.

También quisieran agradecer el soporte de los directores y personal de PT Perkebunan Nusantara II, una compañía de plantaciones que permitió el uso de sus plantaciones en Sumatra para el estudio de caso/proyecto piloto a medida que se fue desarrollando el PAXSYS. También, los cinco años durante los cuales parte de este sistema se desarrollaron y probaron en el campo, no

hubieran sido posibles sin la ayuda sincera de todo el personal de ARAB - desde los digitadores de datos hasta el personal de campo y los agrónomos (especialmente Mr. Unni Krishnany Mr. G. Umashankar), y a los ingenieros de software. Los doctores NT. Arasu y E. Pushparajah también fueron muy generosos en compartir con nosotros sus experiencias de muchos años sobre agronomía de la palma de aceite y caucho. Todo el proyecto PAXSYS no hubiera progresado si no hubiera sido por el Director de ARAB, Dr. M.M. Guha, quien siempre quiso ver que todo se hiciera "ayer".

Finalmente quisiéramos agradecer a todos nuestros clientes por ayudar a ARAB durante estos años y por la financiación implícita del desarrollo de PAXSYS. Algunos de ellos han contribuido con sugerencias para el desarrollo del software y en hacer un mejor PAXSYS. Debemos a ellos nuestro aprecio por sus ayudas.

BIBLIOGRAFÍA Y OTRAS REFERENCIAS

- CHAN, K.W.; YEE, C.B.; LIM, K.C.; GOH, M. 1985. Effect of rainfall and irrigation on oil palm yield production. Guthrie Research Chemara. In: National Conference on Soil-Climate Relationship on Crop Production in Malaysia. Proceedings. Malaysian Society of Soil Science, p.43.
- CALIMAN, J.P. 1992. Oil palm and water deficit, production. Adapted Cropping Techniques. Oleagineux (Francia) v.47 no.5, p.
- CORLEY, R.H.V. 1976. Inflorescence abortion and sex differentiation. In: R.H.V. Corley; J.J. Hardon; B.J. Wood. Oil Palm Research (Eds.). Amsterdam, Elsevier. p.37-54.
- FOSTER, H.L.; CHANG, K.C.; TAYEB, DOLMAT; AHMADTARMIZI. MOHAMED; ZIN, Z. ZAKARIA. 1985. Oil palm yield response to N & K fertilizers in different environments in Peninsula Malaysia. PORIM Occasional Papers (Malasia) no.16, 23p.
- _____; AHMADTARMIZI. MOHAMED; M. TAYEB. HJ. DOLMAT; CHANG. K.C.; ZIN, Z. ZAKARIA; HJ ABDUL, HALIM HASSAN. 1986. Fertilizer recommendations for the oil palm in Peninsula Malaysia (First Approximation). PORIM Bulletin (Malasia) no. 13, 42p.
- GERRITSMA, W. 1990. Light interception, leaf photosynthesis and sink-source relations in oil palm. In: ISOPB International Workshop on Yield Potential in the Oil Palm. Oct. 29-30, 1990, Phuket, Thailand. PORIM. Kuala Lumpur. p.109-121.
- _____. 1998. Simulation of Oil Palm Yield. Technical Report. Dept of Theoretical Production Ecology. Agricultural University-Wageningen.
- KEE, K.K.; CHEW, P.S. 1991. Oil palm responses to nitrogen and drip irrigation in a wet monsoonal climate in Peninsula Malaysia. In: 1991 PORIM International Palm Oil Conference. Proceedings. PORIM. Kuala Lumpur. p.321-339.
- LINGAHHONG. 1979. Some lysimetric measurements of evapotranspiration of oil palm in Central Peninsula Malaysia. In: Symposium on Water in Malaysian Agriculture. Proceedings. Kuala Lumpur. Malaysian Society of Soil Science. p.89.
- LUDLOW, A.R. 1991. Modelling as a tool for oil palm research. In: 1991 PORIM International Palm Oil Conference. Proceedings. PORIM. Kuala Lumpur. p.273-289.
- NG, S.K.; THAMBOO, S. 1976. Nutrient contents of oil palm in Malaya. Malaysian Agriculture Journal (Malasia) v.46, p.3-45.
- ORRELL, I.; FOSTER, H.L. 1991. The importance of nitrogen fertilizer application to oil palm in New Britain, PNG and its effects on magnesium status. PNG Oil Palm Research Station.
- SINGH, GURMIT. 1989. Fertilizer responses in oil palms on a range of alluvial soils. United Plantations Berhad, Teluk Intan. Malaysia.
- VANKRAAUNGEN, D.W.G. 1985. Simulation of oil palm growth and yield. Technical Report. Dept of Theoretical Production Ecology. Agricultural University - Wageningen. Netherlands.
- _____; BREURE, C.J.; SPITTERS, C.J.T. 1989. Simulation of oil palm growth and yield. Agricultural and Forest Meteorology. v.46, p.227-244.
- WILKIE, A.S.; FOSTER, H.L. 1989. Oil palm response to fertilizers in PNG (1989). PNG Oil Palm Research Station. In: 1989 International Palm Oil Development Conference. Proceedings v. 1, p.395-405.

APÉNDICE I

Computación de la Reserva de Agua del Suelo (SWR) utilizando el Modelo de Hidrología en PAX*Agua

El Modelo de Hidrología en PAX*Agua se utilizó para procesar las diferentes variables de componentes de la siguiente identidad de la Reserva de Agua del Suelo (SWR).

Reserva de Agua del Suelo (SWR) = Reserva de Agua del Suelo (SWR) (del mes anterior) + precipitación + Irrigación

Escorrentía - Lixiviación

Evaporación - Transpiración

En palabras, la Reserva de Agua del Suelo (SWR) en el presente mes t es igual a la Reserva de Agua del Suelo (SWR) en el mes anterior ($t-1$) más la Precipitación (RF) e Irrigación (IRRI) en el mes t , pero menos Escorrentía/Lixiviación y Evapotranspiración - también en el mes t .

Desafortunadamente, las plantaciones raramente mantienen información sobre los contenidos del agua del suelo a lo largo del tiempo mediante medidas directas, utilizando sondas neutrónicas, lisímetros o hasta los relativamente económicos bloques de yeso. Quizás esto no sea práctico para todos los bloques para las lecturas diarias/mensuales, especialmente con los instrumentos más costosos, tales como las sondas neutrónicas. El uso de estos instrumentos también significa más trabajo - los transductores piezométricos que registran el contenido de agua tiene que ser recalibrados periódicamente, etc. Por lo tanto, los resultados del experimento con lisímetros realizados por Ling (1979), donde los datos fueron correlacionados entre precipitación, Humedad del suelo y Evapotranspiración y los diferentes parámetros climáticos (viento, temperatura y radiación solar) no se pudieron utilizar para desarrollar un modelo para incorporarlo dentro de PAXSYS si éste va a ser utilizado *en plantaciones y basado en información mantenida por las plantaciones*.

Es por esto que se tuvo que desarrollar funciones/ecuaciones y declaraciones lógicas calibradas para calcular valores para cada una de las variables de los componentes mencionados arriba en la identidad de Reserva de Agua del Suelo (SWR) para el ambiente existente en cada bloque. Esto comprobó ser bastante complejo y tomaba mucho tiempo hacerlo, ya que nosotros sólo podíamos tener información de tipo subjetivo tal como la clasificación de textura y las pendientes de un bloque individual (ignorando cualesquiera variaciones localizadas dentro del bloque). Nuevamente, los modelos hidrológicos de investigación que relacionan los tamaños de partículas a las fuerzas matrices y por consiguiente a las capacidades del suelo de mantener el agua (con frecuencia utilizando ecuaciones diferenciales) no eran muy prácticos para ser utilizados en PAXSYS si el sistema iba a ser utilizado a diario en plantaciones comerciales.

En vista de que los registros de las plantaciones incluyen detalles sobre referencia de bloques, año de siembra, textura del suelo, clase de pendiente y precipitación - ésta es la única información que PAXSYS utiliza para generar cálculos de reservas de agua del suelo y el perfil de reserva de agua del suelo y lo hace utilizando los siguientes principios generales:

- Los datos sobre Precipitación e Irrigación normalmente son mantenidos por las plantaciones, y estas variables no necesitan más computación.
- Los cálculos de Escorrentía y Lixiviación se basaron en la textura del suelo y la pendiente y, hasta cierto punto, en el efecto de la sombra- aproximados por la edad (con base en el año de siembra) y el índice del Área Foliar (LAI) de la siembra.
- Los cálculos de Evapotranspiración se basaron en el edad de la siembra y el índice del Área Foliar (LAI) (para calcular los efectos de la sombra), la cantidad de Precipitación (RF) (supuesto inversamente en proporción a la temperatura promedia del suelo debido al contenido de arena).

Sin embargo, en la forma como resultó, el modelo hidrológico en PAXSYS*Agua que se describe en este artículo, funcionó bastante bien al hacer pronósticos, utilizando el modelo de función de producción en PAX* Pronóstico de Rendimiento.