

Simulación Matemática y Optimización del Secado de Productos Agropecuarios con Aire Natural y Energía Solar

En este trabajo se discuten las principales características de los sistemas de secado de productos agropecuarios con aire natural y energía solar y se presenta un programa de computador con el cual es posible simular, simultáneamente, la variación meteorológica, el proceso de secado y el proceso de deterioración de productos agropecuarios y optimizar el diseño de sistemas de secado solar y natural.

El programa constituye una herramienta básica que forma parte de una metodología de trabajo desarrollada por los autores para el estudio y evaluación desde el punto de vista técnico del potencial de secado con aire natural y energía solar de regiones tropicales.

JORGE H. DOMINGEZ

Ingeniero Agrícola

ALFONSO PARRA

Ingeniero Agrícola

LUIS GABRIEL VILLA

Ingeniero Agrícola Ph.D.

Profesor Asociado

Universidad Nacional

El secado de productos agropecuarios es una operación de vital importancia para garantizar la preservación de la calidad de éstos durante el manejo y almacenamiento, después de la cosecha. En las últimas décadas la crisis energética y los precios crecientes de los combustibles han aumentado considerablemente los costos de secado por los medios convencionales de secado a alta temperatura, exigiendo la búsqueda de otras fuentes de energía para este fin.

A partir de experiencias realizadas en diferentes países se ha demostrado que la energía solar y el aire natural son fuentes energéticas adecuadas y eficientes para el secado, no sólo por su bajo costo sino por su flexible adaptación a explotaciones agrícolas de diferentes tamaños.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL SECADO SOLAR Y NATURAL

El sistema de secado natural o solar consiste, esencialmente, en forzar caudales bajos de aire ambiente o ligeramente calentado por medio de una capa estática de producto utilizando un ventilador. El calentamiento del aire se realiza por medio de colectores solares planos hasta una temperatura cinco o diez grados centígrados por encima de la temperatura ambiental (ver figura 1).

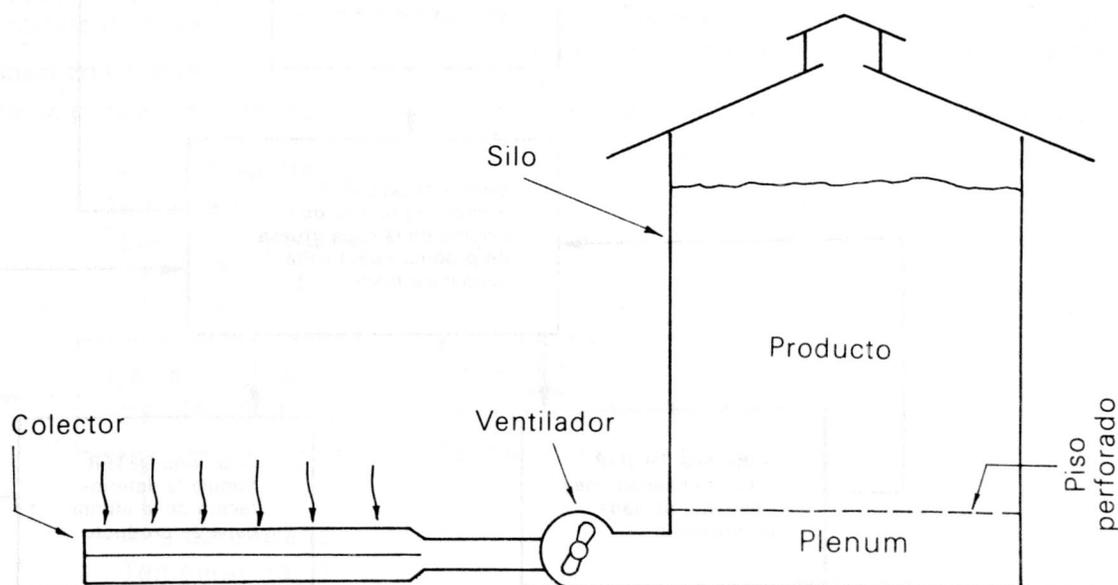


FIGURA 1. Esquema de un sistema de secado con energía solar.

Debido a que se utilizan temperaturas y flujos de aire bajos, el secado solar y natural se caracterizan por requerir períodos de tiempo prolongados para la culminación del proceso, del orden de días o semanas, lo cual genera un riesgo de deterioro del producto antes de que se alcance un contenido de humedad seguro para su manejo y almacenamiento.

Una forma de evitar el riesgo de deterioro es usar flujos de aire altos con los cuales se logra secar el producto rápidamente, conservando así su calidad. Sin embargo, el uso de caudales altos es crítico en sistemas de secado a baja temperatura, pues, en general, se secan simultáneamente grandes cantidades de producto, lo cual implica altos requerimientos de potencia y energía, especialmente si se tiene en cuenta que debido a la relación exponencial que existe entre caudal y potencia, una duplicación del caudal requiere aumentar la potencia casi ocho veces; de la misma forma, con una reducción relativamente pequeña del flujo de aire se logra una disminución significativa en la energía y potencia requeridas.

El criterio fundamental para el diseño de sistemas de secado solar y natural es entonces lograr secar el producto hasta un contenido de humedad seguro antes de que se produzca un nivel de deterioro determinado que comprometa su calidad. Esto determina que el caudal utilizado sea el principal parámetro de diseño del sistema, constituyéndose en la clave que determina el éxito o fracaso del proceso; existe un flujo de aire mínimo requerido con el cual se garantiza que el producto se va a secar sin perder su calidad.

Si se proporciona el caudal mínimo requerido se puede obtener un producto final de alta calidad debido a que el secado es lento y a baja temperatu-

ra, por lo cual se adapta muy bien al secado de semillas. El secado a baja temperatura es, además, la única forma económicamente viable para productos con alto contenido de humedad inicial, en los cuales la cantidad de agua por remover es grande, ya que la energía para el secado proviene de fuentes naturales como son la radiación solar y la entalpía del aire ambiente.

El secado solar y natural es un proceso muy complejo que involucra un gran número de variables relacionadas con el producto y el aire de secado. Las propiedades físicas, químicas y biológicas del producto tales como los parámetros de secado, las características morfológicas, el contenido de humedad y la velocidad y susceptibilidad de deterioración entre otras, y las propiedades del aire como el caudal utilizado, la temperatura y la humedad relativa determinan los procesos de secado y deterioración.

Otro elemento que complica el estudio y diseño de sistemas de secado solar y natural es que su funcionamiento está sujeto de una forma determinante a la impredecibilidad y variación de las condiciones climáticas que determinan el proceso de secado. Para cuantificar la variación climática y lograr diseñar sistemas seguros y eficientes se requiere un tratamiento probabilístico del problema a partir del estudio de las condiciones climáticas en relación con el secado en la región y época de cosecha en los cuales va a ser operado el sistema, durante una serie de años lo suficientemente larga, del orden de diez años.

Debido a estos factores, la experimentación directa del campo es una forma costosa, dispendiosa y prolongada para realizar estudios sobre secado solar y natural.

Con el desarrollo de la tecnología de los computa-

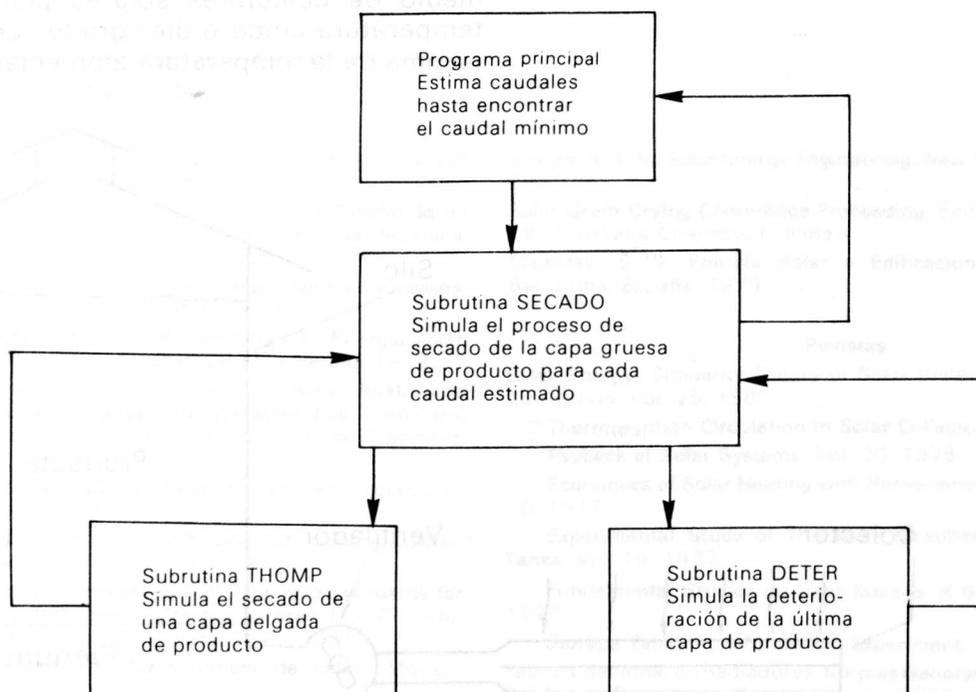


FIGURA 2. Diagrama general del programa

dores, cuyas ventajas y posibilidades tienden a popularizarse cada vez más y la adecuación de modelos con los cuales es posible simular los procesos de secado y deterioración en función del tiempo y las condiciones de operación del sistema, incluyendo la variación de las condiciones climáticas a partir del uso de registros meteorológicos, se ha demostrado que la técnica de simulación matemática es una herramienta adecuada para la predicción del secado y la determinación de caudales mínimos de una forma rápida, sencilla y económica, con una flexibilidad que permite el estudio de todas las variables involucradas. De esta forma, la simulación matemática se constituye en la única manera práctica de realizar estudios sobre la operación de sistemas de secado solar y natural.

DESCRIPCION DEL PROGRAMA

El objetivo fundamental del programa desarrollado consiste en determinar el flujo de aire mínimo requerido para secar el producto bajo unas condiciones específicas de operación, antes de que se alcance un nivel de deterioro previamente establecido como el máximo permisible para preservar la calidad del producto.

El programa se desarrolló en FORTRAN IV en un computador IBM-360 de la Universidad Nacional. Consta de un programa principal (modelo de optimización) y tres subrutinas: Subrutina THOMP (simula el secado de una capa delgada de producto), subrutina SÉCADO (simula el secado de la capa gruesa de producto) y subrutina DETER (simula la deterioración durante el secado); en la figura 2 se muestra un diagrama general del programa.

El programa simula y optimiza el secado solar y natural de maíz desgranado, pero se puede adaptar fácilmente a otros productos, previo el conocimiento de los parámetros de secado y el modelo de deterioración. La simulación del secado se basa en el modelo de Thompson y la simulación de la deterioración en el modelo de Steele.

Optimización de caudales

Debido a que no existe un procedimiento analítico

para cuantificar la relación existente entre el flujo de aire utilizado y la deterioración producida con cada caudal, el procedimiento utilizado por el programa consiste en realizar sucesivos estimativos del flujo de aire hasta encontrar el caudal mínimo requerido. Para cada caudal estimado el programa realiza la simulación completa de los procesos de secado y deterioración bajo las condiciones de operación especificadas, y con base en los resultados de los estimativos se va acercando al caudal buscado por medio de un método de aproximaciones sucesivas.

El programa de optimización de caudales (programa principal) consiste esencialmente en un método para calcular ceros de funciones desconocidas; en este caso la función desconocida es la relación que existe entre el caudal y la deterioración, siendo el caudal la variable independiente. Se utiliza un método de interpolación polinomial que predice sistemáticamente dónde está localizado el cero de la curva desconocida (caudal óptimo) a partir de todos los estimativos anteriores; después de $n+1$ ensayos la predicción es equivalente a resolver la ecuación de orden n a través de los $n+1$ puntos observados, y el cero de esta ecuación es el cero estimado para la función desconocida. El procedimiento se repite hasta encontrar el cero de la función, es decir, el flujo de aire con el cual se produce el nivel de deterioro buscado; este será el caudal mínimo para el secado bajo las condiciones simuladas.

El método de interpolación polinomial se caracteriza por converger rápidamente, lo cual es especialmente importante en este caso, ya que cada estimativo requiere una simulación completa del proceso de secado; el método encuentra el valor buscado después de unos 4 ó 5 estimativos.

Simulación del secado

El secado es un proceso continuo con cambios simultáneos en el contenido de humedad del producto, la humedad relativa y las temperaturas del aire y el producto; los valores de estos parámetros y sus modificaciones varían en función del tiempo y la posición en la capa gruesa de producto.

El enfoque básico para la simulación del secado

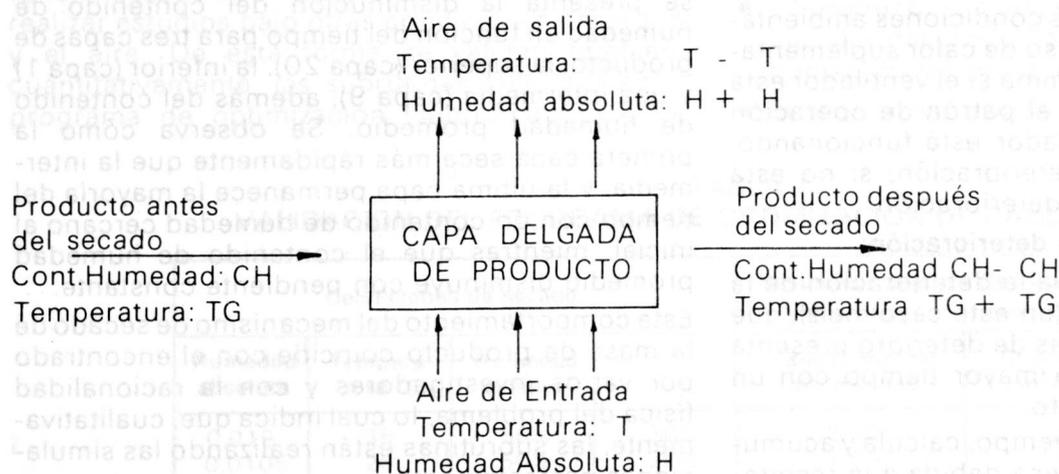


FIGURA 3. Esquema del secado en capa delgada.

consiste en dividir el proceso en muchos pasos pequeños y calcular el secado en capas delgadas durante incrementos de tiempo pequeños; combinando el efecto de muchas capas delgadas se puede simular el secado de la masa total de producto.

La simulación del secado de cada capa delgada la realiza la subrutina THOMP teniendo en cuenta los cambios que ocurren en el aire y el producto durante cada incremento de tiempo, como se muestra en la figura 3. Durante cada intervalo de tiempo, el aire pasa a través de la capa delgada, el producto disminuye su contenido de humedad ΔCH y el aire aumenta su humedad absoluta en ΔH debido a la remoción de humedad. Simultáneamente, la temperatura del grano aumenta en ΔTG y la temperatura del aire disminuye en ΔT como consecuencia del enfriamiento evaporativo y el calentamiento del grano.

El secado o rehumidificación de la capa delgada de producto se calcula a partir de dos condiciones del aire de entrada (H y T) y dos condiciones del grano (CH y T). Las condiciones del aire de salida ($H + \Delta H$ y $- \Delta T$) y de la capa delgada de producto, después de que el aire ha pasado a través de ella ($CH - \Delta CH$ y $TG = \Delta TG$), se calculan por medio de balances de masa y energía mediante el uso de cuatro parámetros de secado del producto (ecuaciones de humedad de equilibrio, calor latente de vaporización, calor específico y secado en capa delgada).

La subrutina SECADO combina el efecto de todas las capas delgadas para simular el secado de la capa gruesa; para cada incremento de tiempo la simulación comienza por la primera capa a través de la cual pasa el aire, tomando luego una a una las capas siguientes usando las condiciones de salida del aire de una capa como condiciones de entrada para la siguiente, hasta llegar a la última. Cada vez que se llega a la última capa se incrementa el tiempo y se comienza nuevamente en la primera capa; el procedimiento se repite hasta que el producto alcanza el contenido de humedad final deseado.

La subrutina SECADO simula también las condiciones de operación del sistema, pues para cada incremento de tiempo calcula la hora del día y con base en ella selecciona las condiciones ambientales, calcula el efecto del uso de calor suplementario (energía solar) y determina si el ventilador está o no funcionando según el patrón de operación seleccionado; si el ventilador está funcionando, simula el secado y la deterioración; si no está operando, simula sólo la deterioración.

Simulación de la deterioración:

La subrutina DETER evalúa la deterioración de la última capa de producto (en este caso maíz), que es la que más posibilidades de deterioro presenta debido a que permanece mayor tiempo con un contenido de humedad alto.

Para cada incremento de tiempo, calcula y acumula la pérdida de materia seca debida a la respira-

ción y la acción de los micro-organismos a partir de la condición del grano expresada por medio de tres parámetros: contenido de humedad, temperatura y porcentaje de daño mecánico. Los dos primeros parámetros se evalúan a partir de los cálculos realizados en la simulación del secado, y el porcentaje de daño mecánico se calcula en función del contenido de grano partido de la masa de grano.

La subrutina también evalúa la deterioración del grano desde el punto de vista de la producción de aflatoxina (micotoxina producida por el hongo, *Aspergillus Flavus*), calculando el período de tiempo en el cual se presentan condiciones favorables para el desarrollo de aflatoxina a partir de la temperatura y el contenido de humedad del grano.

VALIDACION DEL PROGRAMA

La validación del programa se realizó en tres etapas consecutivas: validación del programa principal (método de interpolación polinomial), verificación de la simulación del secado y validación del programa de optimización de caudales.

Validación del programa principal

Para comprobar que el método de interpolación polinomial funcionaba correctamente se seleccionó arbitrariamente una función objetivo cualquiera, en este caso la ecuación de humedad de equilibrio de Henderson-Thompson y se usó el programa para determinar el cero de esta función bajo unas condiciones particulares. Se encontró que el programa realizaba correctamente el procedimiento, obteniéndose un resultado que coincidía exactamente con el valor buscado. Se estableció también que el método convergía rápidamente, adaptándose al propósito de optimización de caudales.

Verificación de la simulación del secado:

Con el fin de observar el comportamiento del contenido de humedad del producto, a medida que avanza el secado, se realizó una verificación cualitativa de las subrutinas SECADO y THOMP, obteniéndose los resultados de la figura 4. En ésta se presenta la disminución del contenido de humedad en función del tiempo para tres capas de producto: la superior (capa 20), la inferior (capa 1) y una intermedia (capa 9), además del contenido de humedad promedio. Se observa cómo la primera capa seca más rápidamente que la intermedia, y la última capa permanece la mayoría del tiempo con un contenido de humedad cercano al inicial, mientras que el contenido de humedad promedio disminuye con pendiente constante.

Este comportamiento del mecanismo de secado de la masa de producto coincide con el encontrado por varios investigadores y con la racionalidad física del problema, lo cual indica que, cualitativamente, las subrutinas están realizando las simulaciones correctamente.

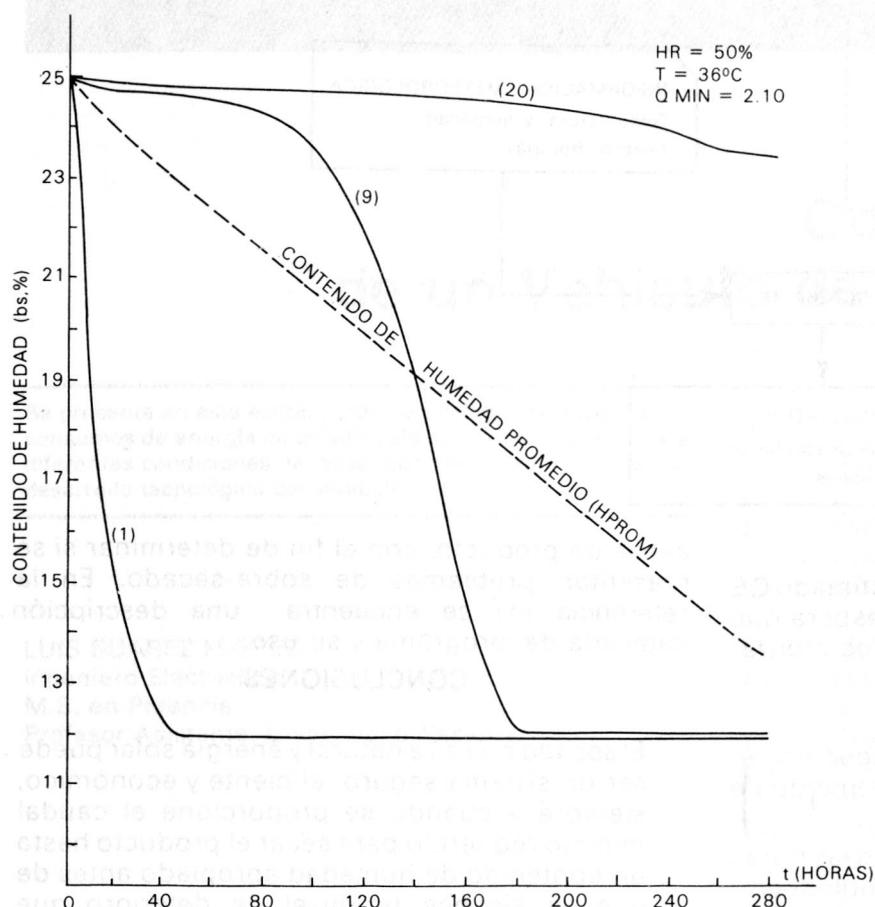


FIGURA 4. Contenidos de humedad simulados en la verificación de la subrutina secado. Capas 1, 9, 20 y contenido de humedad promedio.

Validación del programa de optimización de caudales:

Una vez validado el programa principal y verificada la simulación del secado se procedió a validar el programa de optimización de caudales (programa principal, más subrutinas), a partir de condiciones de secado constantes. Esta validación se hizo para dos condiciones de secado diferentes, para las cuales se conocían los resultados obtenidos por Vallderuten.

Comparando los resultados obtenidos por el programa con los resultados obtenidos por Vallderuten (ver tabla 1), se encuentra que los caudales mínimos requeridos coinciden para ambos casos, lo cual indica que el programa de optimización funciona correctamente y puede ser utilizado para realizar estudios bajo otras condiciones del grano y el aire. De esta forma se validan también, cuantitativamente, las subrutinas incluidas en el programa de optimización (subrutina SECADO,

THOMP y DETER).

COMO USAR EL PROGRAMA

El programa simula el secado y optimiza el flujo de aire determinando el caudal mínimo requerido para secar el producto bajo las condiciones especificadas. El programa se alimenta con la información meteorológica del lugar y los datos de entrada referentes a las condiciones de operación; después de realizar las simulaciones y la optimización, el programa reporta los resultados de cada estimativo y los finales (ver esquema general del sistema, figura 5).

Los datos de entrada se refieren a las condiciones de operación del sistema y consisten en información referente a:

- El producto: se especifican las condiciones iniciales del producto en cuanto a contenido de humedad, temperatura y deterioración.
- El silo: se especifica la geometría del silo y el

TABLA 1
VALIDACION DEL PROGRAMA DE OPTIMIZACION DE CAUDALES

Condiciones de secado				Resultado, según Vallderuten	Resultado, según prog. de optimiz.
Humedad absoluta	Temperatura °C	Humedad relativa		Caudal mínimo m ³ /min-ton	Caudal mínimo m ³ /min-ton
0.019	36	50%	20%	2.10	2.10
0.0105	26	50%	20%	1.05	1.12

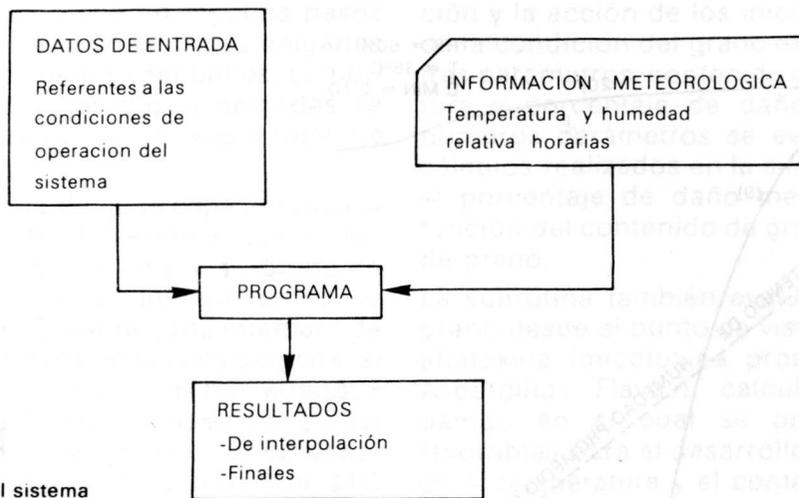


Figura 5, Esquema general del sistema

espesor de la capa de producto.

- El caudal: se suministra un caudal estimado Q_E y un rango $\pm \Delta Q$ dentro del cual se espera que esté el caudal mínimo, seleccionados arbitrariamente por el usuario.
- El lugar: presión atmosférica.
- Los intervalos de simulación: se especifica el espesor de la capa delgada y el incremento de tiempo para la simulación.
- El patrón de operación: se especifican las horas del día en las cuales se opera el ventilador.
- El calor suplementario: se suministra el incremento de temperatura promedio producido por el calor suplementario (energía solar).

La información meteorológica consiste en dos vectores que especifican la temperatura y humedad relativa cada hora para un día típico bajo las condiciones estudiadas.

Los resultados que entrega el programa consisten en:

Resultados de interpolación: para cada caudal estimado se reportan el tiempo con potencial de aflatoxina, el caudal, la deterioración producida, el tiempo de secado y el tiempo total.

Resultados finales: Una vez concluido el proceso de optimización el programa reporta el caudal mínimo requerido, el tiempo con potencial de aflatoxina, la deterioración, el tiempo de secado y el tiempo total obtenidos con ese caudal; se reportan además el contenido de humedad promedio y el contenido de humedad para todas las

capas de producto, con el fin de determinar si se presentan problemas de sobre-secado. En la referencia (1) se encuentra una descripción detallada del programa y su uso.

CONCLUSIONES

- El secado con aire natural y energía solar puede ser un sistema seguro, eficiente y económico, siempre y cuando se proporcione el caudal mínimo requerido para secar el producto hasta un contenido de humedad apropiado antes de que se alcance un nivel de deterioro que comprometa la calidad del producto.
- El programa de computador desarrollado es una herramienta adecuada para estudiar y optimizar los diferentes parámetros que influyen en el funcionamiento de un sistema de secado a baja temperatura, de una forma rápida y económica que facilita la realización de estudios del potencial de secado de muchas regiones y localidades.
- Es necesario avanzar en el estudio de los parámetros de simulación de los productos, especialmente en lo referente a modelos de deterioración, cuya limitada existencia restringe el estudio del secado a baja temperatura para muchos productos.

Nota:

En un artículo posterior se reportará el estudio del potencial de secado con aire natural y energía solar de una región, utilizando el programa presentado.

BIBLIOGRAFIA

- Domínguez, J., Parra A. **Estudio del potencial de secado con aire natural y energía solar de una región**. Tesis de Grado sin publicar, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1982.
- McKinian, D.N. Baker. **Modeling, Experimentation, Verification and validation: Closing the Feedback Loop**. Transactions of the ASAE, 1982, 25 (3): 647-653.
- Ross I.J. et al. **Potential for Aflatoxin Development in Low Temperature Drying Systems**. Transactions of the ASAE, 1979, 22(6): 1439-1443.
- Rossi, J.R., Roa, G. **Secagem e Armazenamento de Produtos Agropecuarios com uso de Energia Solar e Ar Natural**. Sao Paulo: ACIESP, 1980.

Steele, J.L. **Deterioration of Damaged Shelled Corn as Measured by Carbon Dioxide Production**. Transactions of the ASAE, 1969, 12(5): 685-689.

Thompson, T.L. et al. **Useful Search Techniques to save Research Time**. Transactions of the ASAE, 1968, 11(4): 461-467.

Thompson, T.L. et al. **Mathematical Simulation of Corn Drying. A new Model**. Transactions of the ASAE, 11(4): 582-586.

Vallderuten R. et al. **Cálculo de Vazoes Mínimas de Ar para Secagem Natural de Milho Baseado Nos Registros Meteorológicos**. VIII Congreso da Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, Botucatu, 1978.