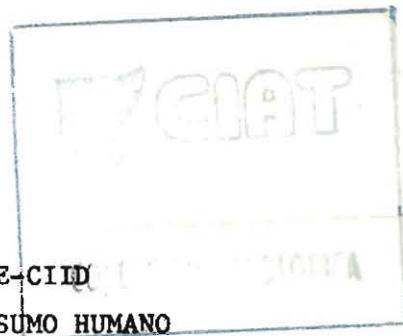


29378



PROYECTO COOPERATIVO CIAT/IIT/UNIVALLE-CIID
PRODUCCION Y USO DE HARINA DE YUCA PARA CONSUMO HUMANO



ESTUDIO DE VARIOS SISTEMAS PARA SECADO DE
TROZOS DE YUCA DESTINADOS AL CONSUMO HUMANO

LISIMACO ALONSO

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL
Sección de Utilización - Programa de Yuca
Abril, 1987

**PROYECTO COOPERATIVO CIAT/IIT/UNIVALLE-CIID
PRODUCCION Y USO DE HARINA DE YUCA PARA CONSUMO HUMANO**

**ESTUDIO DE VARIOS SISTEMAS PARA SECADO DE
TROZOS DE YUCA DESTINADOS AL CONSUMO HUMANO**

LISIMACO ALONSO

**CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL
Sección de Utilización - Programa de Yuca
Abril, 1987**

RESUMEN

Un sistema de secado simple y versátil, conformado por una infraestructura poco costosa con posibilidad de ampliarse modularmente y que pueda funcionar con reducidos costos de operación es la alternativa que puede ser recomendada para pequeños y medianos agroempresarios y en general para cualquier persona con escasa preparación técnica. La investigación que se llevó a cabo en el área de secamiento de trozos de yuca enfocó el trabajo hacia la caracterización de los diferentes tipos de trozos de yuca con los que se contaba en el momento, la evaluación de las diferentes fuentes energéticas disponibles en el mercado y el estudio de los diferentes sistemas de secado que desde un principio se consideraron adecuados para obtener un producto seco de buena calidad para el consumo humano.

En el sistema natural se tuvieron en cuenta las modalidades (métodos) de secado sobre pisos de concreto y bandejas inclinadas que deben emplearse solo en las épocas secas del año. Dentro de los sistemas artificiales que pueden secar yuca durante todo el año se seleccionó el método de capa fija por tandas y la opción artificial cuasi continua que opera con bandejas removibles dentro de una cámara donde el aire las atraviesa de abajo hacia arriba. El secado mixto que somete primero los trozos de yuca a secado natural y luego a una etapa final artificial fue la última alternativa de secado que se tuvo en cuenta en los estudios.

A pesar que existieron diferencias de forma y tamaño entre los trozos Brasil, Malasia y Tailandia (barras rectangulares, tiras finas y tajadas gruesas, respectivamente) en términos de tiempo solo en el secado sobre bandejas inclinadas el trozo Tailandia tuvo tiempos de secado significativamente más largos.

Las barras rectangulares se destacaron por la uniformidad y facilidad de manejo, cualidades que permitieron realizar un secamiento más homogéneo y parejo, pudiéndose trabajar hasta con cargas de 200 kg por m² en los sistemas artificiales de capa fija por tanda, sin que el lecho

se asiente y compacte. Con los trozos Tailandia y Malasia solo se recomiendan de 150 a 100 kg/m², respectivamente.

En el secado natural la yuca fresca requiere generalmente dos días completos de exposición al sol para llegar a niveles de humedad de 12% b.h. Las cargas óptimas que se hallaron para las condiciones del CIAT^{a/} fueron 16 kg/m² en bandejas inclinadas para los trozos Malasia y Brasil y 12 kg/m² para los trozos Tailandia. En pisos de concreto la carga ideal para cualquiera de los trozos fue 10 kg/m².

La radiación solar captada por medio de un colector solar plano, el carbón mineral, el combustible diesel y el gas propano fueron las fuentes energéticas disponibles que se probaron con el fin de seleccionar las mejores alternativas en términos de las características de las unidades de transferencia de calor, costos de inversión y operación de los sistemas y facilidades de control y manejo de las condiciones de operación.

En la Costa Atlántica (Depto. de Sucre) se evaluó un sistema artificial de capa fija acoplado a un colector solar plano que calentó el aire de secado. Con las condiciones climáticas que reinaron durante el ensayo, el colector solar incrementó la temperatura en un promedio de 5°C, con una eficiencia térmica de 63%. Sin embargo, de los resultados obtenidos se pudo concluir que la total dependencia de las condiciones climáticas y los grandes costos de la infraestructura son algunos de los factores que le impiden competir al sistema artificial solar (acoplado a un colector plano) favorablemente con las modalidades naturales en las épocas secas del año.

Para estudiar el efecto de la temperatura y el caudal sobre el tiempo de secado y el consumo de combustible en un sistema artificial de capa fija por tandas, trozos frescos de yuca se sometieron a caudales de 130 y 190 m³/min por tonelada fresca con temperaturas de 50° y 60°C. A pesar que el proceso con carbón obtuvo la menor eficiencia global (25-35%), el costo de operación fue el menor debido a su relativo bajo precio.

^{a/} Centro Internacional de Agricultura Tropical, km 167 carretera Cali Palmira, A.A. 6713, Cali. COLOMBIA.

Una cámara de un secador artificial en capa fija se acondicionó con rieles que soportaron las bandejas y permitían el deslizamiento de éstas dentro de la misma cámara.

El ensayo tuvo como objetivo estudiar el efecto de dos densidades de carga (20 y 30 kg/m² de bandeja) y dos niveles de temperatura (50° y 60°C) sobre el tiempo de secado y el flujo de yuca seca.. Una bandeja se introducía cada hora y cuando los trozos alcanzaban una humedad inferior a 12% (b.h.) la bandeja se retiraba de la cámara. Con el caudal de trabajo de 20 m³/min por cada metro cuadrado de área se consiguieron tiempos totales de secado entre 8.4 y 12 horas y el tiempo de espera necesario para extraer la siguiente bandeja tendió a estabilizarse entre 2 y 2.5 horas. A pesar que el sistema puede funcionar con más de 4 niveles de bandejas, las láminas perforadas (3% de área abierta) que constituyen las bandejas ocasionan un aumento en la caída de presión del aire y una disminución del caudal que deben tenerse en cuenta con el fin de seleccionar unidades de ventilación mucho más grandes.

El consumo ajustado de carbón por tonelada de producto seco alcanzó aproximadamente los 700 kg superando en un 40% el consumo del sistema de capa fija por tandas, porque tiene períodos en los cuales solo funcionan 1 ó 2 bandejas.

La comparación de los costos de inversión en infraestructura y los consumos de combustible y requerimientos de mano de obra efectiva, para todos los sistemas estudiados con una capacidad de 2,700 kg de yuca fresca por día, ratificó las bondades de los sistemas naturales en las épocas secas y la capacidad de bajar costos que tiene el secado mixto tanto en la operación del quemador de carbón como en la alternativa de un colector solar plano acoplado a un secador artificial.

ESTUDIO DE VARIOS SISTEMAS PARA EL SECADO DE
TROZOS DE YUCA DESTINADOS AL CONSUMO HUMANO

INDICE

	Pag.
PROLOGO.	
I. Consideraciones preliminares.....	1
II. Caracterización de la forma y el tamaño de los trozos producidos por las máquinas trozadoras disponibles.....	6
III. Comportamiento de trozos de yuca sometidos a secado natural y artificial por tandas en capa fija.....	9
IV. Utilización de varias fuentes de energía en un sistema artificial de capa fija por tandas.....	13
V. Primeros estudios sobre un método de secado mixto o combinado.....	23
VI. Evaluación de un sistema de secado artificial de bandejas con flujo transversal.....	28
VII. Costos de inversión y operación de varios sistemas de secado.....	34
VIII. Informe preliminar de algunos ensayos de secado sobre un piso de concreto modificado.....	38
IX. Conclusiones.....	40
X. Reseña bibliográfica de las investigaciones de soporte...	43

PROLOGO

El presente documento constituye el informe de los estudios que se llevaron a cabo dentro del proyecto cooperativo CIAT-IIT-Univalle/CIID con el fin de seleccionar varias alternativas adecuadas para secar trozos de yuca destinados al consumo humano. Esta recopilación sintetiza y resume los resultados más destacados generados en cada una de las investigaciones realizadas dentro del propio proyecto y de algunos trabajos paralelos llevados a cabo en el proyecto cooperativo DRI-CIAT sobre establecimiento de plantas de secado de yuca para consumo animal en la Costa Atlántica de Colombia. En la parte final de este documento se listan las referencias bibliográficas de cada uno de los informes de las investigaciones ejecutadas, seguido del Anexo I, que contiene las fotocopias de los mismos informes de soporte dentro de los cuales se registra la totalidad de la bibliografía consultada en cada caso.

ESTUDIO DE VARIOS SISTEMAS PARA EL SECADO DE TROZOS DE YUCA
DESTINADOS AL CONSUMO HUMANO

I CONSIDERACIONES PRELIMINARES

Desde un comienzo se tuvo en cuenta que el proceso de secado lo deberían manejar pequeños y medianos agroempresarios, personas con escasa preparación técnica y por esto, la recomendación de aplicar un sistema determinado, estuvo sujeta a las siguientes condiciones:

- a) Baja capacidad de procesamiento (3 toneladas de producto fresco por día) con posibilidad de ampliar su rendimiento en forma modular.
- b) Bajo capital de inversión y reducidos costos de operación.
- c) Simplicidad y versatilidad.
- d) Operación que garantiza un producto seco de buena calidad.

Durante los dos años de duración del proyecto fue necesario trabajar sobre tres aspectos de importancia que resultan de la relación entre el producto y el sistema de secado:

- a) Características de los trozos de yuca fresca, objeto de la deshidratación.
- b) Fuentes energéticas disponibles y desempeño de sus unidades de transferencia de energía y
- c) Métodos de secado o manera de emplear cada uno de los elementos de un sistema de acuerdo con las variables y parámetros que gobiernan el proceso.

Las raíces de yuca deben trozarse con el fin de que el secado se lleve a cabo en forma rápida. Desde un principio se contó con varios tipos de máquinas trozadoras que pueden producir básicamente tres diferentes tipos de trozos: barras rectangulares, "tajadas" irregulares y "tiras" finas. Cada uno de estos trozos se evaluó con diferentes métodos de secado con el fin de conocer su comportamiento desde el punto de vista del tiempo de secado, estudiando sus características también con respecto a otros factores inherentes a cada método.

Con relación a las fuentes energéticas disponibles, la misma radiación solar y la entalpía del aire ambiente se emplearon en los sistemas naturales estudiados y en algunos artificiales que fuerzan aire ambiental previamente calentado por medio de colectores solares. No siempre es conveniente la utilización de los métodos naturales por las condiciones climáticas adversas, la incapacidad para obtener un producto seco con buena calidad y la necesidad de realizar un proceso rápidamente. En estos casos, es necesario elevar apreciablemente la temperatura del aire de secado, empleando otras fuentes energéticas disponibles en la región.

En el Cuadro 1 están consignados los sistemas y métodos de secado, que desde un principio se consideraron convenientes para emplearse dentro de un proceso de producción de yuca seca de alta calidad para consumo humano y en los renglones siguientes se anotan las consideraciones que en el momento se tuvieron en cuenta para cada uno de ellos.

El secado natural, que aprovecha la radiación solar, y la entalpía propia del aire ambiente en movimiento, es el sistema tradicional más sencillo y asimilable fácilmente por personas de bajo nivel técnico. El proceso natural en bandejas horizontales o inclinadas permitiría un secado más rápido bajo condiciones más higiénicas que las conseguidas sobre los pisos de concreto. Obviamente, este sistema con bandejas no es aconsejable para zonas con alta contaminación ambiental.

En el secado artificial se controlan las condiciones de operación del sistema, tales como la temperatura y la cantidad de aire aplicado, lo que haría factible su utilización en las épocas lluviosas. En el caso en que se pudiera disponer rápidamente de toda la cantidad de trozos frescos, se podría considerar el sistema artificial por tandas o por lotes. En este método los trozos se colocan sobre una lámina perforada soportada por la estructura que constituye la cámara de secado. El aire atraviesa la lámina perforada y el producto que yace sobre ésta, lográndose de esta forma la realización del proceso. En la primera modalidad, cuando el aire solo circula en un sentido, es necesario mezclar continuamente los trozos con el fin de uniformizar la humedad.

CUADRO 1. Sistemas de secado adecuados para deshidratar trozos de yuca para consumo humano

Natural	. Pisos de cemento	Mezclado Periódico. El diseño del área de secado debe facilitar las diferentes actividades para que el nivel de higiene sea alto.
	. Bandejas inclinadas	Mezclado escaso de los trozos, solo necesario para altas densidades de carga. En el manejo de los trozos existe menos posibilidad de contaminación
	. Capa fija y flujo de aire en un solo sentido	Se requiere volteo frecuente de toda la capa de trozos para uniformizar la humedad.
Artificial por tandas o lotes	. Cama estática y flujo de aire reversible	La capacidad del sistema es baja porque deben emplearse capas delgadas para minimizar las diferencias de humedades.
Mixto por tandas o lotes	. Durante una primera fase, el producto se somete a secado natural y después de que ha llegado a cierto nivel de humedad se emplea un secador de capa fija que logra reducir el contenido de humedad a niveles seguros para almacenamiento.	
	. Bandejas estáticas dentro de una cámara de secado.	El producto fresco se suministra periódicamente al secador y las bandejas con los trozos secos se extraen cuando han alcanzado el contenido de humedad deseado.
Artificial casi continuo	. Túnel	Funciona de igual forma que el anterior, pero las bandejas dispuestas en varios estantes con rodamientos, recorren un túnel de un extremo a otro a medida que nuevas bandejas entran con trozos frescos y las anteriores salen con trozos secos.

Cuando existe la posibilidad de invertir el flujo de aire se evita la operación manual de mezclado, pero se reduce la capacidad del sistema porque las capas de producto no deben ser mayores de 10 a 15 cm, para que las diferencias de humedades entre el fondo y la superficie sea mínima. En general, la eficiencia global de operación de estos sistemas artificiales por tandas sería baja, pero se podrían lograr incrementos con cambios en los flujos de aire y la temperatura de acuerdo con la etapa por la que atraviesa el proceso; Aún, podrían introducirse períodos de reposo, pero todas estas modificaciones deben tenerse en cuenta solo cuando los usuarios tengan la habilidad y los conocimientos necesarios para realizarlos.

El secado mixto o combinado, donde el producto se sometería primero a secado natural (que extraería la mayor parte del agua contenida) y luego a un proceso artificial, mejoraría notablemente la eficiencia, disminuiría los costos de operación y aumentaría la capacidad de los equipos de una planta procesadora que cuente con ambos sistemas.

Desde un principio se consideró la eliminación de la cáscara y la fibra de las raíces de yuca, con el fin de conseguir un producto seco de alta calidad con bajo contenido de ceniza y fibra. Se pensó en una máquina lavadora-peladora como primera alternativa para llevar a cabo la separación antes del trozado. Como una segunda opción, la combinación de una molienda y un tamizado podría realizar la extracción de la cáscara y la fibra después de la operación de secamiento. Esta última opción nos evitaría el pelado inicial y permitiría pensar en un proceso por tandas o lotes, en donde encajarían los métodos de secado que hasta el momento se habían discutido.

La primera alternativa, representada por el empleo de una máquina lavadora-peladora, implicaría un proceso lento porque esta máquina solo procesaría entre 400 y 500 kg por hora, y no sería conveniente esperar a que todo el producto hubiera sido pelado y trozado para iniciar el secado, porque se perdería la calidad por el rápido deterioro fisiológico que sufre la yuca fresca en trozos. Para este caso, se consideró un sistema de secado que permitiría iniciar el proceso casi

simultáneamente con la operación de lavado-pelado. Para el caso de este sistema "cuasi-continuo", el producto fresco se podría suministrar periódicamente, cada una o dos horas. Dos modalidades se tuvieron en cuenta dentro de este sistema de secado, que trabajarían, con bandejas perforadas, sobre las cuales se depositarían los trozos de yuca. En la primera, el aire atravesaría de abajo hacia arriba las bandejas que se encontrarían apoyadas sobre unos soportes dentro de una cámara. Las bandejas entrarían y saldrían de la cámara periódicamente, de acuerdo con el flujo de trozos frescos y secos. En la segunda modalidad, las bandejas que contienen el producto se apilarían en plataformas o estantes con rodachines que deben recorrer un túnel de un extremo a otro, a medida que el producto se seca debido al paso del aire por encima y por debajo de las bandejas. En términos generales, serían métodos de fácil manejo, que trabajarían con temperaturas moderadas, convenientes para la deshidratación de trozos de yuca, pero necesitarían volúmenes de aire mucho más grandes que los requeridos por los sistemas de capa fija por lotes. La capacidad de estos sistemas sería también baja comparada con los rendimientos de sistemas continuos, como los de bandas transportadoras y tambores rotatorios de alto costo, que emplean altas temperaturas y que exigen un perfecto control sobre el proceso.

Estos planteamientos generales y todas las consideraciones hechas inicialmente, sirvieron de base para la formulación y planificación de todos los ensayos que se ejecutaron durante la vida del proyecto con el objeto de caracterizar y seleccionar las mejores alternativas de secado que podrían recomendarse para obtener un producto seco de buena calidad.

En los siguientes párrafos se sintetizan y resumen los principales resultados obtenidos en cada uno de los estudios realizados, cuya referencia bibliográfica se encuentra consignada en la parte final de este informe.

II CARACTERIZACION DE LA FORMA Y TAMAÑO DE LOS TROZOS PRODUCIDOS POR LAS MAQUINAS TROZADORAS DISPONIBLES

De acuerdo con los dispositivos de corte, cada máquina produce un trozo típico (Figura 1). En el Cuadro 2 se describe la forma típica y se reportan las dimensiones promedias características de los trozos, obtenidas de muestreos repetidos realizados por Castillo y otros(1) y Best y otros (1986).

CUADRO 2. Forma típica y tamaño promedio ^{a/} de cuatro trozos de yuca producidos por diferentes máquinas trozadoras

Trozadora	Forma típica	Dimensiones (mm)		
		Largo	Ancho	Espesor
Brasil	Barras rectangulares	50-70	10	4-6
Tailandia	Tajadas gruesas	60-80	25-30	7-10
Malasia	Tiras finas	50-80	4-6	4-6
Colombia ^{b/}	Barras rectangulares	50-70	10	6-10

^{a/} Valores promedios de 18 pruebas de secado.

^{b/} Valores promedios de 6 mediciones realizadas por Best y otros (1986).

La yuca, por la irregularidad en la forma de sus raíces y la manera como éstas llegan a la cuchilla, no permite que ninguna de las máquinas produzca más de un 45% de trozo típico (Figura 2). En el Cuadro 3 podemos observar los resultados de una clasificación granulométrica que permitió separar el material producido por cada máquina en 3 fracciones. La máquina Malasia produjo el más alto porcentaje de partículas finas o ripio, mientras que la máquina Colombia, solo alcanzó un porcentaje de 15%. La porción total de trozos delgados y ripio alcanzó en todos los casos valores mayores a 55%, hecho que explica algunos de los resultados obtenidos en los ensayos de secado, acelerando el proceso en algunos casos y dificultando el manejo del producto en otros.

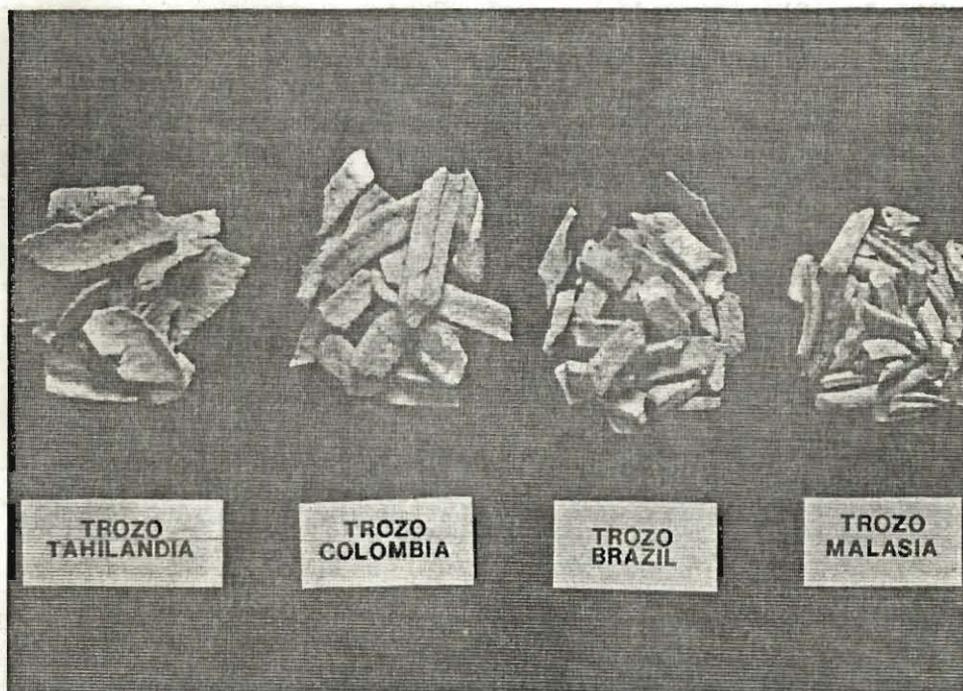


FIGURA 1. Trozos de yuca fresca producidos por las máquinas picadoras Tailandia, Colombia, Brasil y Malasia.

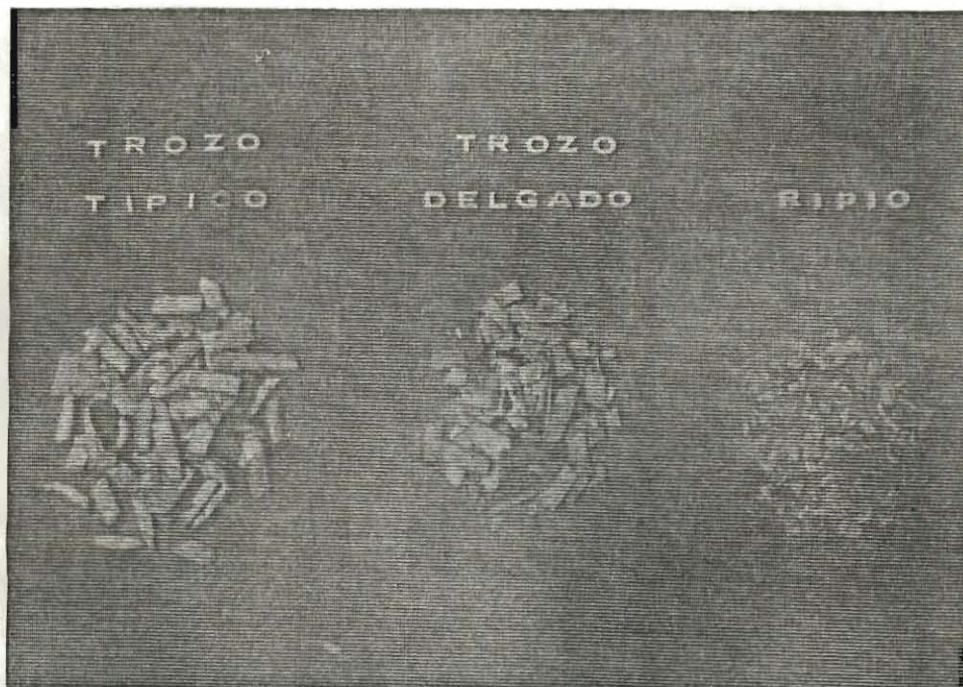


FIGURA 2. Caso típico de las diferentes fracciones de trozos que produce la máquina trozadora Brasileira.

CUADRO 3. Clasificación granulométrica de trozos de yuca producidos por diferentes máquinas trozadoras

Trozadora	Porcentaje ^{a/} promedio de las fracciones		
	Trozo típico	Trozo delgado y/o partido	Partículas finas
Brasil	45	35	20
Tailandia	42	34	24
Malasia	35	29	36
Colombia ^{b/}	36	49 ^{c/}	15

^{a/} Valores promedios de 18 pruebas de trozado.

^{b/} Valores promedios de solo 6 pruebas.

^{c/} Corresponde solo a trozo partido con longitudes entre 20-30 mm, porque la producción de trozo delgado es despreciable.

III. COMPORTAMIENTO DE TROZOS DE YUCA SOMETIDOS A SECADO NATURAL Y ARTIFICIAL POR TANDAS EN CAPA FIJA

Con el fin de comparar la respuesta de los tipos de trozos disponibles en términos de tiempo de secado cuando se someten al proceso bajo las mismas condiciones, Castillo y otros (1985) utilizaron el sistema natural en las modalidades de piso de concreto y bandejas inclinadas (Figura 3) y Alonso y otros (1986a), emplearon un sistema artificial de capa fija forzando aire a 60°C (Figura 4). Los estudios realizados permitieron conocer mejor los sistemas, desde el punto de vista del manejo de sus elementos, comportamiento de diferentes densidades de carga, requerimientos energéticos, etc.

El análisis estadístico de ambos trabajos permitió concluir que los tres trozos de yuca (barras rectangulares, tajadas gruesas y tiras finas) se comportan similarmente cuando se emplea el secado natural sobre pisos de concreto y el artificial en capa fija con aire a 60°C. A pesar que la diferencia en términos de tiempos de secado no fue significativa, el trozo Tailandia presentó tiempos más largos. Esta tendencia sí se presentó con diferencias significativas cuando se utilizó el sistema natural sobre bandejas inclinadas, mientras que los trozos Brasil y Malasia se secaron más rápidamente sin mostrar diferencia entre ellos. El Cuadro 4 consigna los valores promedios generales de los tiempos de secado logrados en ambos trabajos.

El sistema de secado natural en bandejas inclinadas es una buena alternativa para obtener yuca seca para alimentación humana. La selección de la carga óptima de 16 kg por cada m² de bandeja se hizo en base a la mayor rata de producción de yuca seca y la calidad final de los trozos secos. En las pruebas de secado el sistema de piso de concreto mostró una mayor capacidad de eliminación de cianuro que el sistema de bandejas inclinadas, debido a la menor tasa de eliminación de agua y la temperatura del propio piso. Estas condiciones crean un ambiente propicio para que la actividad de la Linamarasa sea más prolongada. Además, se notó la tendencia de una mayor eliminación para las densidades de carga más altas. Castillo (1) llevó a cabo una segunda serie de pruebas

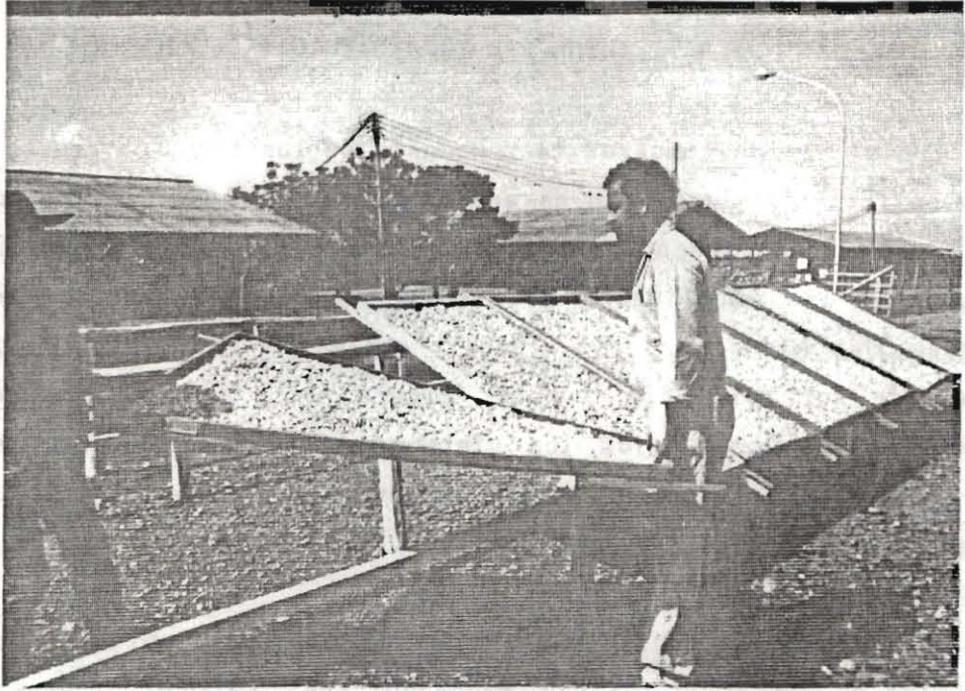


FIGURA 3. Sistema de secado natural sobre bandejas inclinadas.

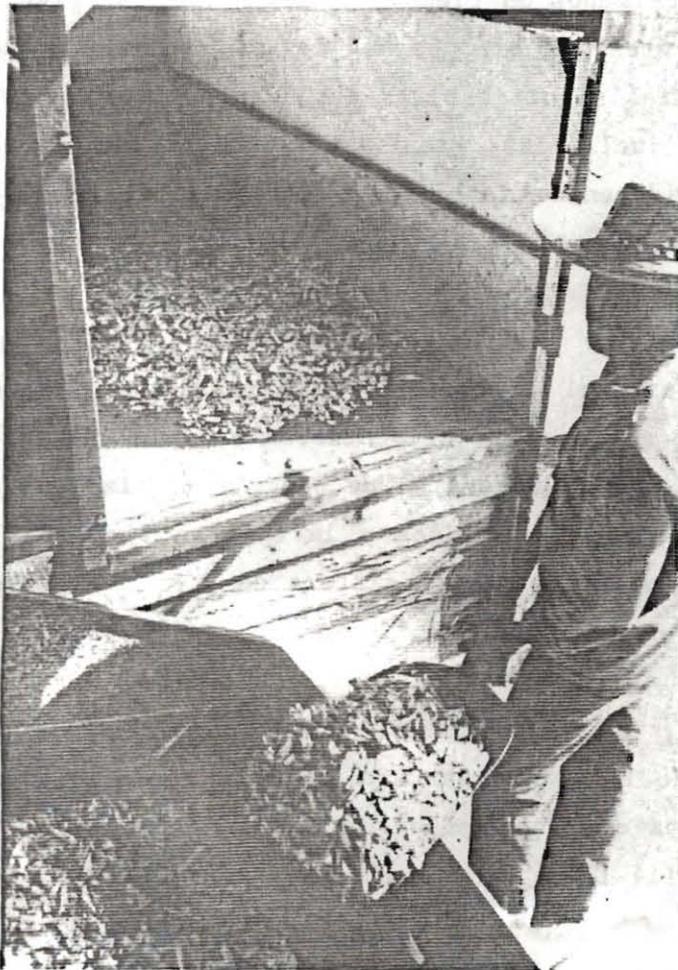


FIGURA 4. Cámara de secado de un sistema artificial por tandas conectado a un quemador de carbón.

con yuca sin cáscara con el fin de evaluar las características finales de olor y color de los trozos secos para densidades de carga entre 8 y 22 kg/m². Se encontró que en términos de olores y colores extraños no hubo diferencias fácilmente detectables para las densidades comprendidas entre 8 y 16 kg/m². Además, el contenido final de cianuro total no fue mayor de 50 ppm para las densidades de carga superiores a 12 kg/m².

Las cargas de 20 y 22 kg/m² mostraron un color pardo amarillento notable y olor fuerte a fermentación. Con la densidad de 16 kg/m² se logró producir 3.44 kg de yuca seca por m² por día. La máxima tasa posible, porque las densidades mayores necesitaron más de dos días para alcanzar la humedad final de 12% en b.h. Esta densidad permitía contar con cierto margen de seguridad en tiempo, necesario para ejecutar las labores de recolección, empaque y cosida de los sacos en un período no menor a 32 horas continuas (dos jornadas de trabajo).

Con respecto al secado en capa fija por tandas, la irregularidad de los trozos de yuca y su alto contenido de humedad inicial son factores que deben tenerse en cuenta cuando se desee trabajar con densidades de carga que logren alturas mayores a 35 cm, debido a las partículas finas, trozos partidos y delgados que dificultan la circulación del aire. Además, la práctica de uniformizar la humedad de los trozos de yuca por medio de remociones periódicas es otro factor que contribuye a compactar la capa por la destrucción que sufren los trozos por la acción de la herramienta utilizada. Las barras rectangulares producidas tanto por la máquina brasilera como por la trozadora tipo Colombia, reducen los efectos negativos discutidos anteriormente y la regularidad de sus dimensiones evita la práctica de prolongar el secado con el fin de garantizar la deshidratación de los trozos más voluminosos producidos cuando se emplea la trozadora Tailandia. De acuerdo con las consideraciones anteriores, para el secado artificial en capa fija por tandas las cargas máximas que recomienda Alonso (3) para los trozos Brasil, Tailandia y Malasia son 200, 150 y 100 kg por m², respectivamente.

La selección del caudal que debe aplicarse por tonelada de yuca fresca en un sistema artificial de capa fija por tanda que opera a 60°C,

CUADRO 4. Tiempos promedios continuos de secado para trozos de yuca sometidos a deshidratación utilizando varios sistemas de secado

Carga kg/m ²	Sistema de secado natural ^{a/}			Secado artificial en capa fija a 60°C		
	Bandejas inclinadas		Pisos de cemento	Caudal aplicado m ³ /min.t ^{b/}	Tiempo neto (h)	Tiempo práctico (h) ^{c/}
	Trozo Brasil y Malasia	Trozo Tailandia	Todos los trozos			
10	26.5	29.0	30.4	380	3.2	4.0
12	27.5	30.5	32.3	190	4.1	6.0
14	28.0	32.0	34.1	127	6.2	8.5
16	30.0	34.0		95	8.2	11.0
18	31.5	35.5				
20	33.0	35.5				

Fuente: Castillo y otros (1985) y Alonso y otros (1986a).

^{a/} Se incluyen las horas de la noche durante las cuales los trozos se cubrieron con una carpa plástica.

^{b/} Se refiere a tonelada inicial de trozos frescos.

^{c/} Se tiene en cuenta el contenido de humedad inicial de la yuca que fluctúa alrededor de 67% b.h. y además el operario suspende el secado cuando el contenido de humedad ha descendido a niveles de 9-10% b.h.

. Condiciones ambientales promedias

Temperatura: 26°C

Humedad: 60°C

Viento: 1.1 m/seg.

. Contenido de humedad de los trozos de yuca en b.h.

Inicial: 57.5% aprox.

Final: 12.3%

dependerá principalmente de la necesidad de realizar la deshidratación en un tiempo determinado. Los tiempos prácticos de secado menores de 6 horas que se logran con caudales mayores a 150 m³ por minuto por tonelada de producto fresco (Cuadro 4) hacen que el sistema funcione con baja eficiencia y en forma costosa por el elevado consumo de combustible y la mayor inversión en quemadores y equipos de ventilación.

IV. UTILIZACION DE VARIAS FUENTES DE ENERGIA EN UN SISTEMA ARTIFICIAL DE CAPA FIJA POR TANDAS

A pesar que es posible calcular con alguna precisión el consumo de varios combustibles, asumiendo la eficiencia térmica global del sistema, se estimó que sería conveniente llevar a cabo pruebas de campo que nos permitieran encontrar las diferencias a nivel práctico, bajo las condiciones reales de operación de los sistemas de secado.

Los resultados prácticos obtenidos, conjugaron el efecto de variables tales como las características propias de cada unidad de transferencia de calor, calidad del combustible, capacidad de control de las condiciones del aire por parte del operario y el propio comportamiento de los trozos de yuca.

Alonso y otros (1986b) y Best y otros (1984) evaluaron un sistema artificial de capa fija por tandas utilizando varias fuentes energéticas para calentar el aire. La posibilidad de secar artificialmente con un colector solar plano se estudió en la Costa Atlántica, en la finca Montañita, localizada en el Departamento de Sucre. En la Sección de Utilización de Yuca (CIAT) se evaluó el sistema empleando carbón mineral, gas propano y diesel.

A. Desempeño de un colector solar plano como fuente de calor para secar yuca

En primera instancia, el Cuadro 5 muestra el comportamiento del colector solar plano de 30 m^2 de área absorbente constituida por láminas de zinc pintadas de negro mate y una cubierta de plástico calibre 6. Con un caudal de 106 m^3 por minuto, se alcanzó un incremento promedio de temperatura de 5°C , funcionando entre las 7:00 y las 19:00 horas del día (Figura 5).

Cuando se acopló una cámara de secado de 6 m^2 de área, el sistema alcanzó una capacidad máxima de procesamiento de 900 kg de yuca fresca por tanda. De esta forma, aplicándose un caudal de 118 m^3 min. por

CUADRO 5. Comportamiento de un colector solar plano de 30 m² de superficie absorbente ^{a/}

Aire ambiental		Radiación			
Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	global incidente cal/cm ² min	Caudal de aire m ³ /min	Aumento de temperatura (°C)	Eficiencia térmica (%)
31	62	0.62	106	5	63

Valores promedios de 43 días de observación entre las 7:00 y las 19:00 h

^{a/} Superficie absorbente conformada por láminas acanaladas de zinc pintadas de negro mate, localizadas por debajo de una cubierta de polietileno.

tonelada de yuca fresca, con el sistema se pueden procesar tres lotes por semana con una producción de 1080 kg de yuca seca (Cuadro 6).

En el Cuadro 7 se comparan los costos de inversión y producción de un sistema natural y otro artificial por tanda que utilizó un colector solar plano sin cubierta plástica (Figura 6), ambos sistemas con una capacidad de 3 toneladas de yuca fresca por día (6 toneladas por lote). Como se puede apreciar, el sistema artificial solar tiene mayor costo inicial por la unidad motor- ventilador requerida para forzar el aire de secado a través del sistema; el consumo de energía eléctrica que requiere el funcionamiento del motor eleva los costos de operación en un 10% aproximadamente. El empleo de un colector solar para secar artificialmente un producto tan húmedo como la yuca, requiere la aplicación de altos volúmenes de aire para compensar el bajo incremento de temperatura y así, garantizar la calidad final con un proceso rápido. Un sistema con capacidad mayor a 6 toneladas por lote, exigiría un motor con una potencia mayor de 5 HP.

FIGURA 5. Colector solar plano con una superficie absorbente de 30 m^2 constituidos por láminas de zinc pintadas de negro mate y una cubierta de polietileno.

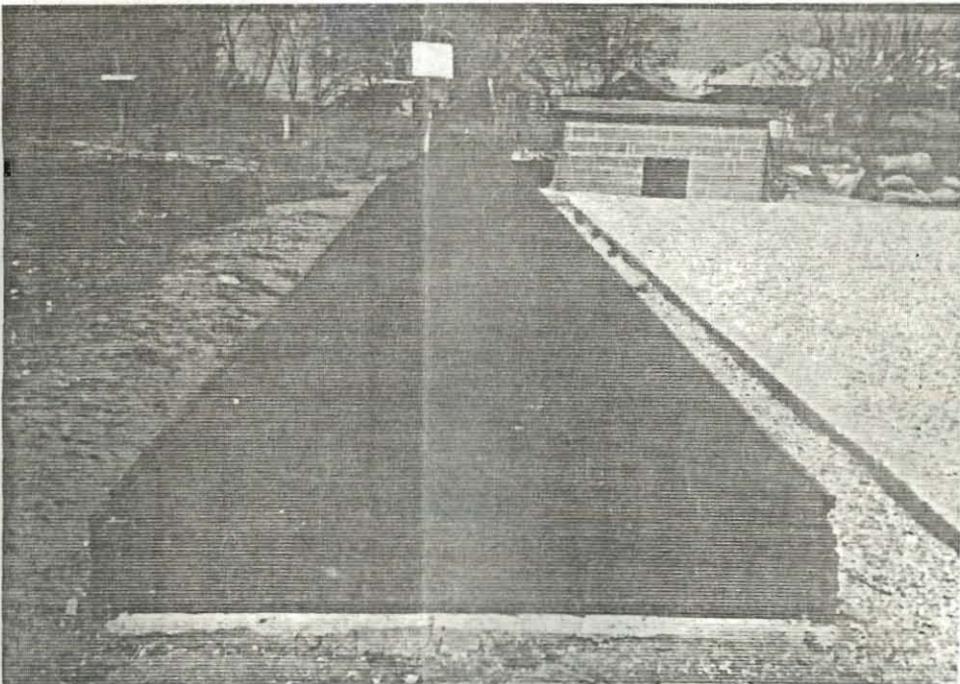
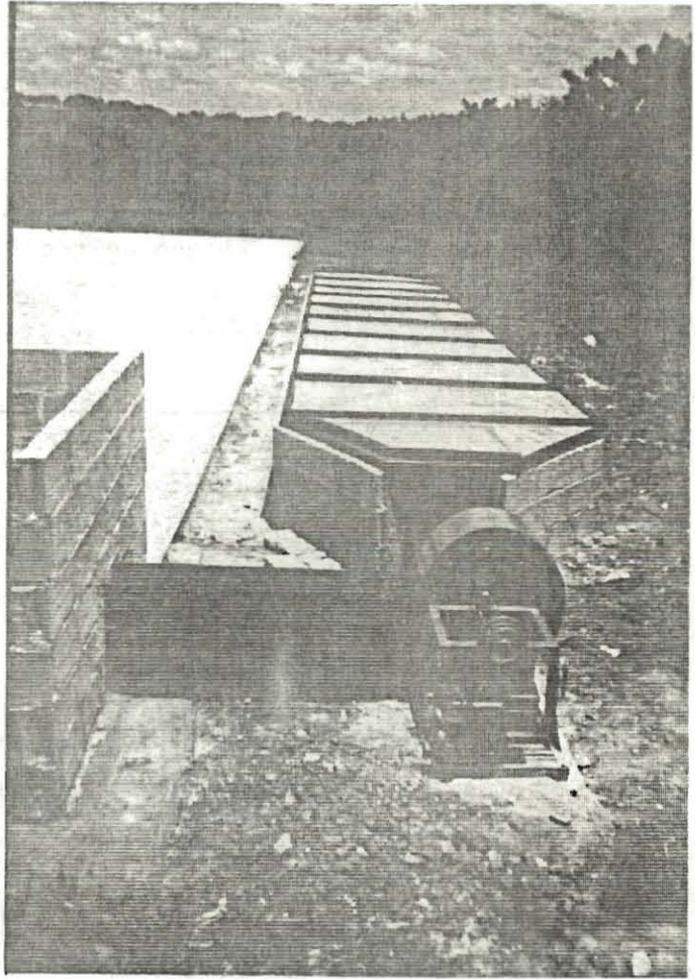


FIGURA 6. Colector solar plano modificado de 30 m^2 , sin cubierta de polietileno acoplado a una cámara de secado de 6 m^2 .

CUADRO 6. Efecto del caudal aplicado sobre el tiempo de secado y la capacidad de un sistema artificial de capa fija acoplado a un colector solar plano

Caudal aplicado (m ³ /min.t)	Tiempo de secado		Capacidad por semana	
	neto ^{a/} (h)	real ^{b/} (días)	Tandas	Yuca seca (kg)
78	41	3.2	1.5	810
88	42	3.3	1.5	720
101	29	2.2	2.0	840
118	26	1.6	3.0	1,080
141	20	1.3	3.0	480

Valores promedios de 3 repeticiones por nivel de caudal.

^{a/} Período de secado de las 7:00 a las 20:00 horas.

^{b/} Incluye las horas nocturnas durante las cuales se suspendía el secado

CUADRO 7. Costos de inversión y producción de dos sistemas de secado con capacidad de 6 toneladas de yuca fresca por lote (3 ton por día)

Sistema	Costos, Col.\$	
	Inversión	Producción por tonelada de yuca seca
1. Natural en piso de concreto	\$ 330,500	\$ 23,580
2. Artificial:		
Cámara (45 m ²)	216.000	
Colector solar (180 m ²)	252.000	
Motor ventilador	600,000	
	<u>\$1,068,000</u>	\$ 24,950
Diferencia	\$ 737.500	\$ 1,370

Costos válidos para 1985

imposible de instalar bajo las actuales condiciones de electrificación de la zona rural colombiana. Los aspectos anteriores, unidos también a la total dependencia del sistema solar a las condiciones ambientales hacen que no pueda competir favorablemente con cualquiera de las modalidades de secado natural.

B. Comparación de varias fuentes energéticas convencionales

Con respecto a las pruebas que se realizaron con carbón mineral, gas propano y diesel, la información del Cuadro 8 muestra el efecto de la temperatura y el caudal sobre el tiempo de secado y el consumo de combustible. Las Figuras 7, 8, 9 y 10 muestran los sistemas utilizados.

Con los caudales aplicados y los niveles de temperatura dados, se pudo secar yuca con 58% de humedad en b.h. hasta un contenido de humedad de 12.3% b.h. entre 5.5 a 10 horas, tiempos que se acomodan perfectamente en una jornada normal de trabajo. La mayor eficiencia se alcanzó con la utilización de gas propano (54 a 72%), seguido por el diesel y el carbón mineral, entre los que no hubo diferencia apreciable (25 a 38%). La combustión del propano se puede hacer directamente en el aire de secado, mientras que para el carbón y el diesel es necesario recurrir a intercambiadores de calor para evitar la contaminación y disminuir los riesgos de incendio.

En el Cuadro 9 se listan los costos de operación generados por el uso de los tres combustibles para cada tonelada de producto seco.

A pesar que el proceso con carbón alcanzó la menor eficiencia y el mayor consumo en términos de calorías suministradas, el costo de operación fue el menor debido a su relativo bajo precio por unidad de peso. Con caudales y temperaturas altas, la eficiencia fue muy baja y los costos de combustible, lógicamente fueron también elevados, y la diferencia de costos entre el carbón y el propano se disminuyó, por lo que la elección entre ellos se debe basar en la disponibilidad del combustible y costos de los equipos de combustión.

CUADRO 8. Efecto de la temperatura y el caudal aplicado sobre el tiempo de secado y el consumo de combustible en un sistema artificial de capa fija por tanda con diferentes fuentes de calor [Alonso (4)]

Temperatura del aire (°C)	Caudal aplicado $m^3/min.t$ ^{a/}	Tiempo neto (h)	Carbón mineral kg	Gas propano kg	Diesel gal
50	130	10.0	250	105	65
	190	7.5	390	110	70
60	130	7.5	300	100	
	190	5.5	550	130	

Valores promedios de 3 repeticiones por tratamiento.

^{a/} Se refiere a toneladas de trozos frescos de yuca.

CUADRO 9. Costos de operación por consumo de combustible en un sistema de secado artificial en capa fija probado con varias fuentes energéticas

Temperatura del aire (°C)	Caudal aplicado $m^3/min.t$ ^{a/}	Costo por tonelada de yuca seca (\$Col)		
		Carbón	Gas propano	Diesel
50	130	1,625	3,150	7,150
	190	2,535	3,300	7,750
60	130	1,950	3,000	- ^{b/}
	190	3,575	3,900	-

Costos válidos para 1986.

^{a/} Se refiere a toneladas de trozos frescos.

^{b/} El equipo solo proporciona 50°C.

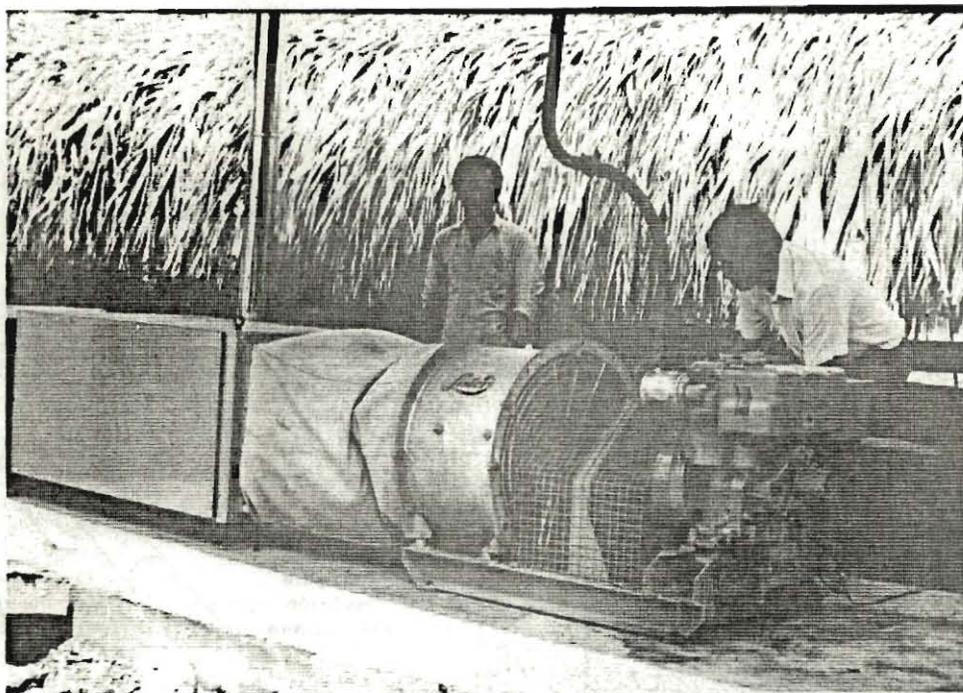


FIGURA 7. Sistema de calentamiento diesel con intercambiador de calor acoplado a un secador de capa fija de 6 m^2 .

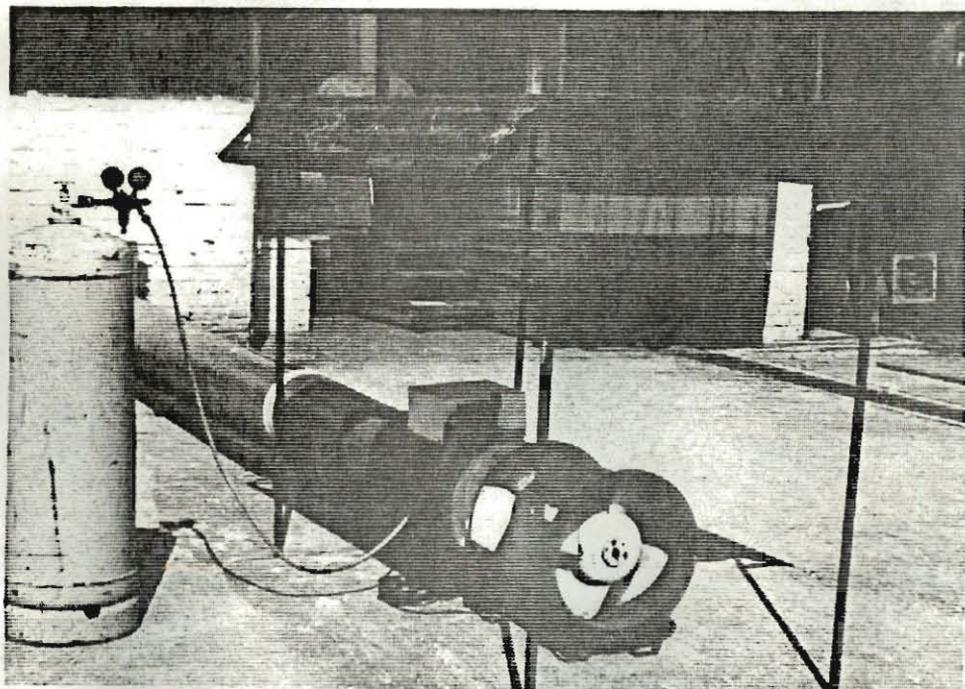


FIGURA 8. Quemador directo de gas propano acoplado a una cámara de secado de 6 m^2 .

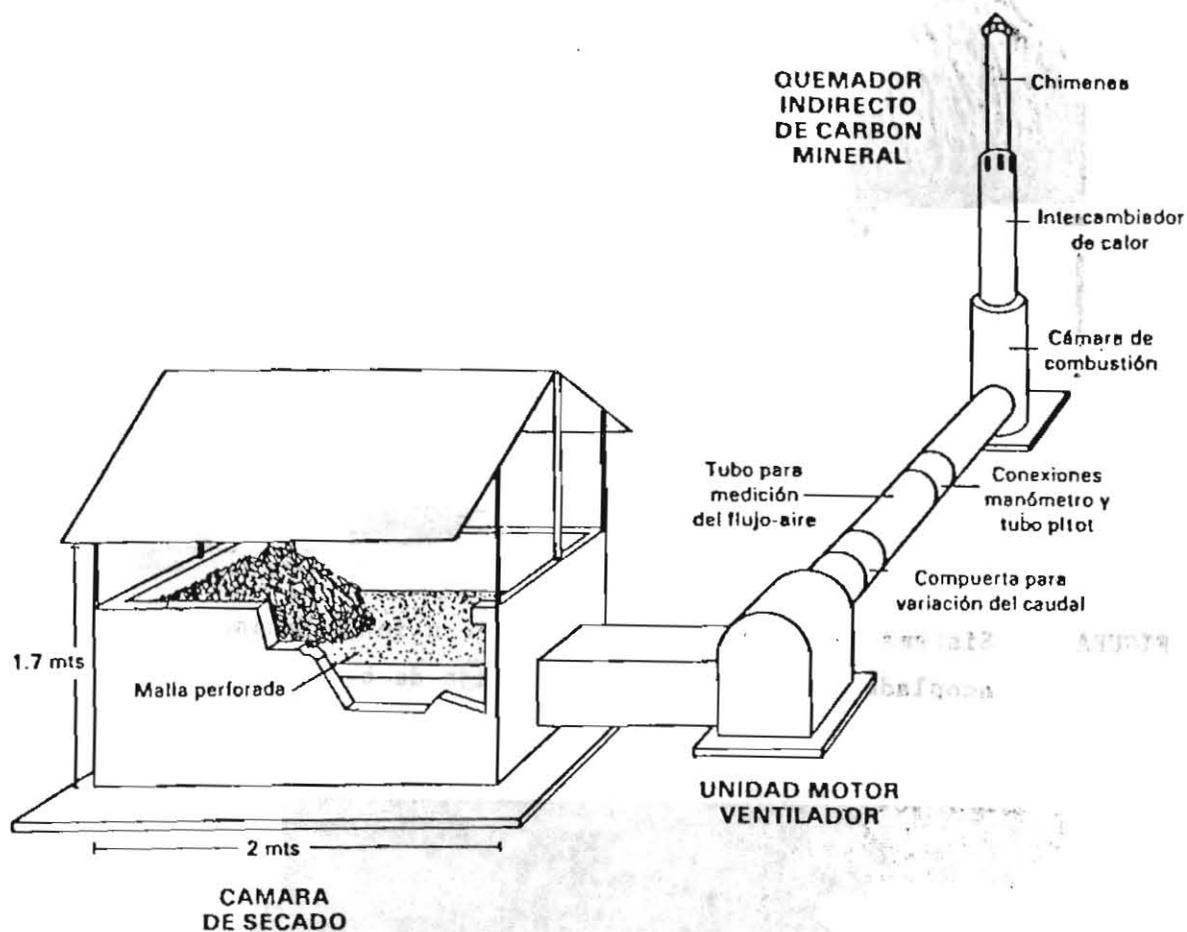


FIGURA 9. Secador artificial de capa fija con quemador de carbón para calentar el aire.

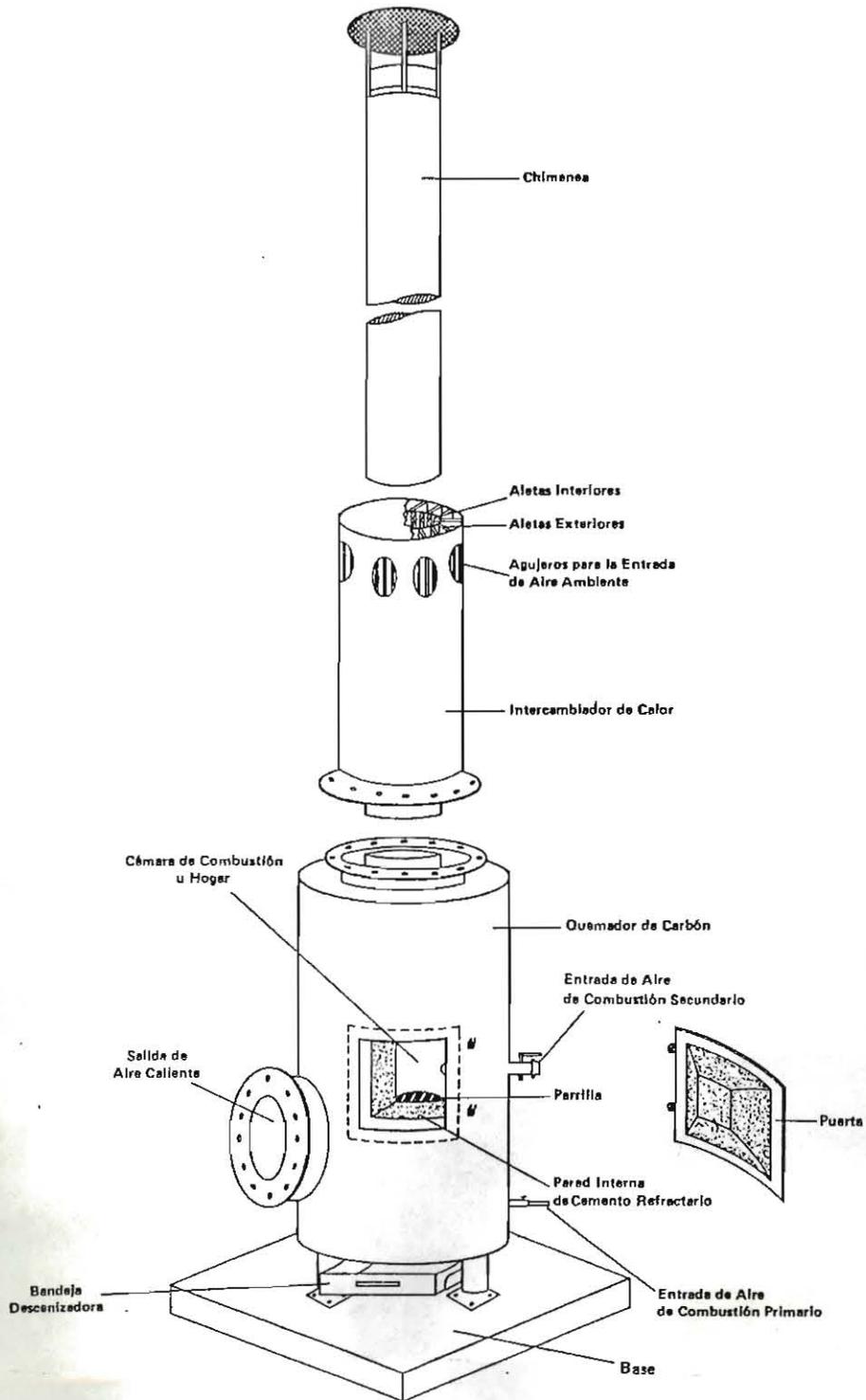


FIGURA 10. Conjunto quemador de carbón e intercambiador de calor.

El aprovechamiento de la energía solar por medio de colectores solares planos es costoso para nuestro objetivo de secar yuca. La inversión es alta y los costos de operación debidos al requerimiento de mano de obra, reposición del plástico y consumo de energía eléctrica son apreciables y además, al igual que el secado natural depende de las condiciones climáticas, lo que impide su utilización en los períodos lluviosos.

El secado en capa fija, utilizando un quemador de carbón mineral, permite deshidratar yuca en los períodos de lluvia. La inversión inicial no tan alta; las necesidades de mano de obra y el consumo eléctrico son bajos, pero se necesitan alrededor de 450 kg de carbón para obtener una tonelada de producto seco, considerándose un contenido de humedad inicial de 67% (b.h) y uno final de 10% (b. h).

V. PRIMEROS ESTUDIOS SOBRE UN METODO DE SECADO MIXTO O COMBINADO ^{a/}

A. Introducción

Durante el primer día de secado natural, los trozos frescos de yuca pueden perder casi el 75% de la totalidad del agua que debe extraerse para que ellos alcancen un contenido de humedad final de 12% (b.h.). Con las anteriores cifras en la mente, se consideró en ese momento que la combinación de un método de secado natural y un método artificial que extrajera el 25% del agua restante permitiría reducir los costos de inversión y operación en una buena porción.

Los primeros ensayos de secado mixto se realizaron en la finca Montañita, Municipio de San Juan de Betulia (Sucre), como una actividad del proyecto de "Establecimiento de plantas de secado de yuca para consumo animal" [Best y otro (1984)]. El sistema se componía de un piso de concreto sobre el cual se realizaba la primera parte del proceso que reducía la humedad a 42% b.h. aproximadamente y un secador de capa fija acoplado a un colector solar plano que permitía realizar la segunda fase del secado completando la deshidratación de los trozos con un contenido de humedad final de 12% b.h. Alonso y otros (1985) estudiaron el sistema desde el punto de vista de su capacidad, manejo y evaluación de otros materiales que pudieran reducir los costos de inversión en la infraestructura.

La mano de obra empleada fue ligeramente superior a la necesaria en el secado sobre pisos de concreto y el consumo de energía solo fue 12.4 kwh por tonelada de yuca seca.

A pesar de la reducción en la eficiencia térmica del colector por la eliminación de la cubierta de polietileno que se localizaba por encima de las hojas negras de zinc, la capacidad del sistema permaneció constante. La eliminación de la cubierta rebajó en un 40% los costos del colector pero la reducción solo representó un 6% en la inversión total del sistema combinado. Los costos de la unidad motor-ventilador representaron casi la mitad de la inversión. Los resultados anteriores

^{a/} Estudio realizado por Miguel Angel Viera y Lisímaco Alonso, asistentes en la Sección de Utilización del Programa de Yuca-CIAT.

sirvieron de base para planificar las posteriores pruebas del estudio de secado mixto que deshidrató trozos de yuca en dos fases; en el primer día los trozos húmedos se esparcían sobre las bandejas inclinadas descritas anteriormente por Castillo y otros (1985), y el proceso finalizaba el día siguiente cuando los trozos se cargaban a la cámara de un secador de capa fija por tandas conectado a un quemador indirecto de carbón, la misma infraestructura que emplearon Alonso y otros (1986), cuando compararon el comportamiento de los diferentes trozos de yuca fresca.

B. Procedimiento y Equipos

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar con el que se quiso analizar la variación de los tiempos de secado que se lograron con el sistema mixto cuando se emplearon cargas iniciales de 340, 450, 560 y 680 kg de trozos de yuca fresca, dispuestos inicialmente en 15, 20, 25 y 30 bandejas inclinadas de 1.4 m^2 de área. Se llevaron a cabo cuatro repeticiones por tratamiento, donde cada repetición fue una prueba independiente en el tiempo, completándose un número total de 16 pruebas que conformaron el ensayo.

Después de lavarse y destocoarse perfectamente, las raíces de yuca se trozaban en la máquina picadora tipo Brasil, que producía barras de sección rectangular de $10 \times 5 \text{ mm}$ [Castillo (1)]. Posteriormente al muestreo para humedad inicial, los trozos se esparcían a las 8:00 horas del día sobre la cantidad de bandejas seleccionada, con una densidad de 16 kg/m^2 .

Cuatro bandejas se pesaban periódicamente con el fin de obtener los registros para graficar posteriormente las curvas de secado. Un mezclado de los trozos se realizaba a las 13:00 horas para cubrirlos posteriormente con una carpa plástica a las 17:00 horas. Los valores de la temperatura ambiental y la humedad relativa se registraron continuamente en un higrotermógrafo. Los valores de la radiación global incidente y la velocidad del viento se calcularon en base a los registros de un piranómetro y un anemómetro de copas respectivamente.

Al día siguiente a las 8:00 horas de la mañana los trozos se montaban a la cámara de secado de capa fija después de pesarse y tomarse una muestra para determinar el contenido de humedad antes de iniciar la fase del secado artificial. El quemador de carbón se encendía media hora antes con el fin de que el aire de secado tuviera una temperatura de 60°C al inicio del secado. Los trozos se mezclaban sobre la cámara de secado cada tres horas para uniformizar la humedad y tomar la muestra para hallar el contenido de agua. El proceso finalizaba cuando los trozos se partían fácilmente al presionarlos con la mano, tomándose la última muestra para determinar la humedad en un horno de ventilación forzada con aire a 60°C durante 24 horas.

C. Resultados y Discusión

Con las condiciones ambientales que predominaron durante la realización de las pruebas, la deshidratación de los trozos sobre las bandejas inclinadas hizo posible bajar el contenido inicial de humedad de 58% b.h. a niveles promedios de 31% en b.h. durante las 9 horas de exposición al sol. Luego, el secador de capa fija con aire a 60°C, en la segunda fase del proceso, llevó el contenido de humedad de los trozos a 13% en tiempos que fluctuaron entre 5,3 a 10.2 horas, dependiendo de la cantidad inicial de trozos alimentados al secador. El Cuadro 10 resume los resultados promedios obtenidos en las pruebas y las condiciones generales promedios en las cuales se desarrolló el ensayo.

Bajo las condiciones ambientales del CIAT (Palmira), el secado sobre bandejas inclinadas eliminó casi un 75% del agua que fue necesario extraer para llevar el contenido de humedad a niveles de 12% (b.h.); luego, al secado artificial solo le correspondió extraer el último 25%. Esto explica la reducción del consumo de carbón mineral por cada tonelada de yuca seca obtenida. El consumo promedio de 450 kg en un secado completamente artificial se redujo a valores entre 100 y 160 kg por tonelada de yuca seca. De todas maneras, este consumo de combustible hace que los costos de operación sean un poco más altos que los conseguidos en el secado enteramente natural, pero se logran costos mucho más bajos que en el secado artificial en capa fija.

VI. EVALUACION DE UN SISTEMA DE SECADO ARTIFICIAL DE BANDEJAS CON
FLUJO TRANSVERSAL a/

A. Introducción

Tal como se había discutido en los primeros párrafos del presente informe, solo se consideraron dos sistemas artificiales de secado con bandejas que nos permitirían absorber la carga de los trozos frescos que nos proporcionaría continuamente la operación de lavado-pelado. Durante la vida del proyecto únicamente se estudió el sistema con bandejas a las cuales el aire de secado la atravesaba de abajo hacia arriba dentro de una cámara o compartimiento (Figura 11). El sistema de túnel (Figura 12) no se probó porque ya para la fecha programada, los resultados positivos obtenidos en los dos molinos de trigo que molturaron trocitos integrales de yuca seca permitieron descartar la operación de pelado inicial de las raíces frescas. De esta forma el lavado de las raíces se puede llevar a cabo rápidamente por tandas lo que hace posible el empleo de secadores por lotes que tienen un manejo más simple y menos costoso.

El presente trabajo tuvo los siguientes objetivos:

- a) Medir el efecto de la densidad de carga y el caudal aplicado sobre el tiempo de secado de los trozos dispuestos sobre las bandejas.
- b) Seleccionar las mejores condiciones de operación del sistema para procesar tres toneladas de yuca fresca por día.
- c) Calcular los costos de operación e infraestructura y equipos para la capacidad antes mencionada.

B. Equipos y procedimiento

El sistema de secado estuvo compuesto por un quemador de carbón mineral con intercambiador de calor, un ventilador centrífugo de aletas curvadas hacia atrás que proporcionaba $40 \text{ m}^3/\text{min}$, y una cámara de secado de 2 m^2 que se adaptó para conseguir la superposición de 5 bandejas

a/ Estudio realizado por Miguel Angel Viera y Lisímaco Alonso, asistentes de la Sección de Utilización del programa de Yuca-CIAT.

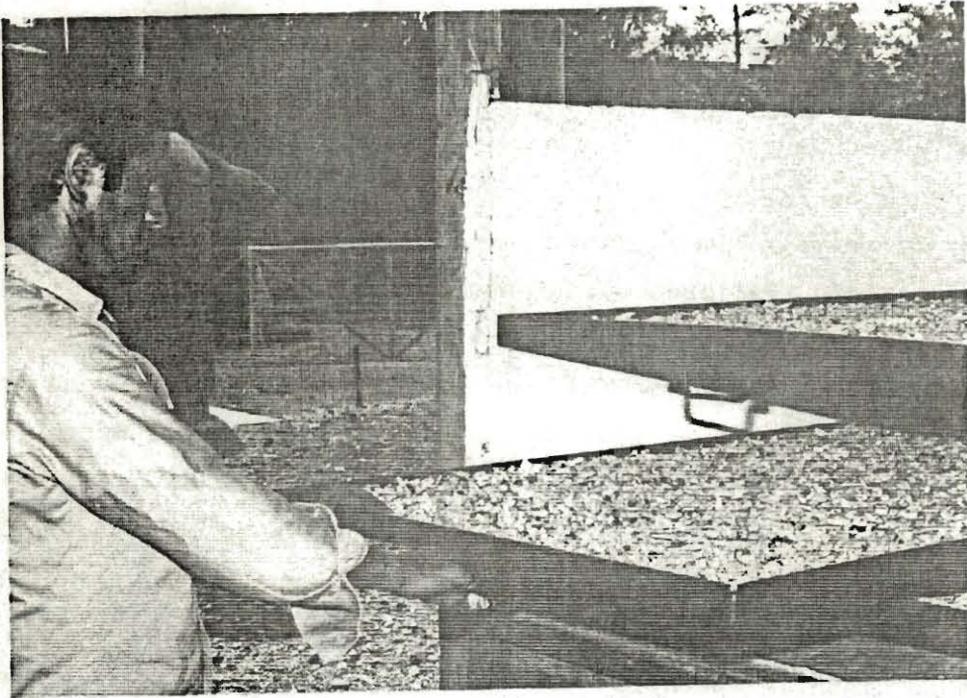


FIGURA 11. Sistema de secado artificial de bandejas removibles dentro de una cámara acoplada a un quemador indirecto de carbón.

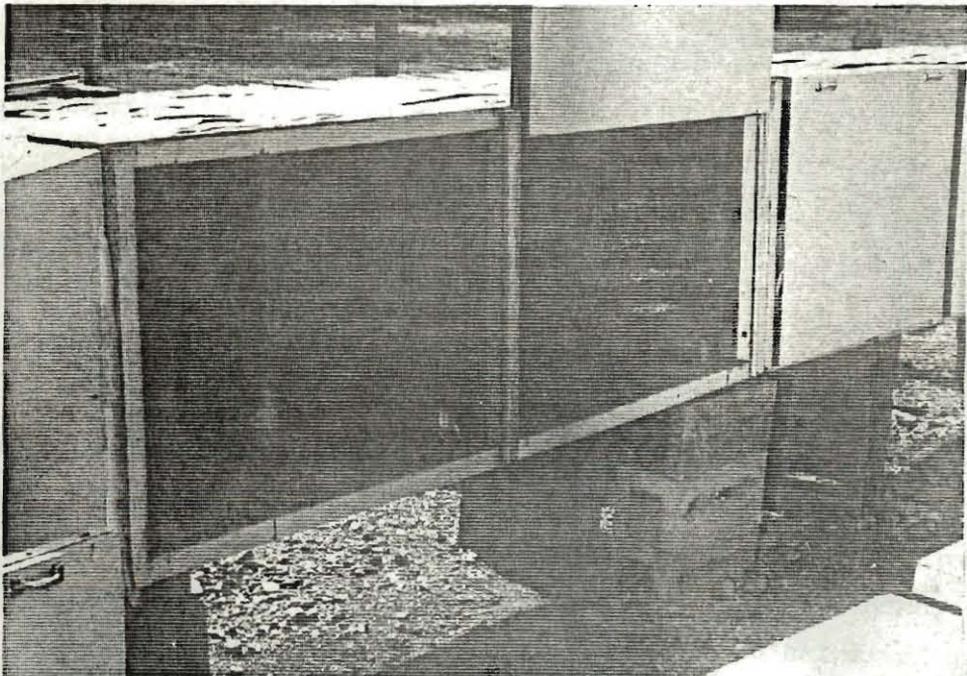


FIGURA 12. Sistema de secado artificial de bandejas dentro de un túnel de ventilación acoplado a un quemador indirecto de carbón.

metálicas que se deslizaban sobre parejas de ángulos de hierro empotrados en las paredes de la cámara. Las bandejas estaban constituidas por un marco de ángulo que servía de soporte a una lámina de acero galvanizado calibre 22, con el 3% de su superficie perforada con agujeros de 3 mm de diámetro. Una descripción más detallada del sistema se encuentra en el estudio realizado por Alonso (4).

El diseño experimental fue completamente al azar en un arreglo factorial de dos densidades de cargas (20 y 30 kg por metro cuadrado de bandeja) por dos niveles de temperatura del aire de secado (50 y 60°C) con cuatro repeticiones por tratamiento. De este modo, se realizaron un total de 16 pruebas de secado, ejecutándose una prueba por día. El caudal aplicado por m^2 de área fue $20 m^3$ /minuto aproximadamente. El sistema iniciaba la operación con la inclusión de la primera bandeja, media hora después de encenderse el quemador de carbón con el fin de que el aire de secado tuviera la temperatura escogida. Cada bandeja adicional se introducía a la cámara una hora después de la introducción de la bandeja del nivel inferior. Para la extracción de los trozos secos, un procedimiento similar se llevaba a cabo con las bandejas inferiores, cuando los trozos alcanzaban niveles de humedad inferiores a 12% en b.h., detectados cuando los trozos se partían fácilmente al presionarlos con los dedos.

El seguimiento de la humedad se logró con el muestreo inicial y final de los trozos y el pesaje periódico de cada bandeja durante el tiempo que duraba la prueba.

Cada vez que se montaba un nivel de trozos se medía el caudal y la caída de presión en los ductos de ventilación. Estos registros fueron importantes porque permitieron evaluar el comportamiento de las láminas que conformaban las bandejas. En el sistema artificial de capa fija por lote la lámina que soporta los trozos frescos debe tener perforado el 3% de su área para que la presión que se consiga en la cámara pleno sea relativamente alta para garantizar el secado uniforme del producto a lo largo y ancho de la cámara. Inicialmente las bandejas se construyeron con el mismo tipo de lámina que utilizan los secadores de grano que

tienen un 30% de área abierta, dejándose en el primer nivel la lámina de 3%. Tal como se esperaba, los trozos localizados en los bordes de las bandejas secaban perfectamente, mientras que los trozos en el centro permanecían húmedos; por esto, para remediar este efecto, todas las bandejas se construyeron en láminas con un 3% de espacio abierto.

C. Resultados y Discusión

Los resultados promedios logrados en el estudio se encuentran tabulados en el Cuadro 11.

Tal como se planearon todas las pruebas anteriores, el ensayo se diseñó para lograr tiempos de secado que correspondieran aproximadamente a una jornada de trabajo. Con el caudal de $20 \text{ m}^3/\text{min}$ por cada metro cuadrado del área del secador y las temperaturas de 50 y 60°C, Se lograron tiempos totales de secado entre 8.4 y 12.0 horas. A pesar que las pruebas se realizaron solo con cuatro niveles de bandejas es posible pensar en el funcionamiento del sistema con tiempos superiores a 12 horas porque el valor del tiempo que es necesario esperar para sacar la siguiente bandeja tiende a estabilizarse en 2 a 2.5 horas, pero es necesario tener en cuenta la caída de presión y la disminución de caudal que debe soportar el sistema cuando se utilizan más de 6 niveles de bandejas, construidas con láminas galvanizadas con 3% de área abierta. Para el caso de este ensayo, durante los períodos en los cuales el sistema operaba con el número máximo de niveles, la presión estática medida en la cámara pleno se incrementaba de 0.62 a 1.10 pulgadas de columna de agua (en promedio), mientras que el caudal suministrado por el ventilador disminuía casi en un 20%.

Los consumos de carbón por tonelada de yuca seca oscilaron entre 540 y 600 kg, superando en un 25% aproximadamente el consumo del sistema artificial de capa fija por lote cuando procesa 100 a 150 kg de yuca por metro cuadrado. Este resultado es lógico porque existen varios períodos del proceso durante los cuales la cámara de secado solo se encuentra funcionando con uno o dos niveles de bandejas, condición que induce una operación menos eficiente que el secado de capa fija.

CUADRO 11. Efecto de la densidad de carga y la temperatura del aire sobre el tiempo de secado y el flujo de yuca seca durante la operación de un sistema artificial con bandejas superpuestas

Temperatura aire (°C)	Densidad de carga (kg/m ²)	Tiempo total <u>a/</u> secado (h)	Tiempo entre bandejas (h) <u>b/</u>				Consumo carbón kg/t <u>c/</u>	Capacidad promedia kg/h.m ² <u>d/</u>
			1	2	3	4		
60	20	8.4	2.5	2.1	1.9	1.9	600	9.5
	30	10.4	2.8	2.9	2.5	2.2	560	11.5
50	20	8.8	3.4	2.0	2.0	1.4	550	9.1
	30	12.0	3.6	3.3	2.8	2.5	540	10.0

Promedios de cuatro observaciones.

a/ Se refiere al tiempo total transcurrido entre la introducción de la primera bandeja y la salida de la última.

b/ Se refiere al tiempo que es necesario esperar para extraer la bandeja con los trozos secos después de la salida de la bandeja anterior (inferior).

c/ y d/ Hacen referencia a yuca seca y fresca, respectivamente.

Condiciones del ensayo:

Caudal: 20 m³/min.m²

Humedad inicial de trozos frescos: 61% b.h.

Humedad final de trozos secos: 12.3% b.h.

Número bandejas por prueba: 4

En cuanto a la capacidad promedio del sistema se destaca los 11.5 kg de yuca fresca por hora por metro cuadrado que pueden procesarse para cargas de 30 kg/m^2 a 60°C , aunque este valor solo representa un poco más del 50% de la capacidad del sistema artificial en capa fija por tandas que llega a 20 kg por hora por m^2 , bajo las mismas condiciones de caudal aplicado y temperatura.

Aparte del alto consumo de combustible la infraestructura es también costosa. Como se comentaba anteriormente, la necesidad de una deshidratación uniforme en toda la extensión de la bandeja obliga a utilizar láminas que deben perforarse agujero por agujero porque no se consiguen comercialmente con porcentajes de abertura menores a 10%.

VII. COSTOS DE INVERSION Y OPERACION DE VARIOS SISTEMAS DE SECADO

En el proyecto de producción y uso de harina de yuca para consumo humano, se ha fijado la capacidad de la planta piloto en 1000 kg. de yuca seca por día; esto significa que el sistema de secado que integraría la planta de procesamiento debe deshidratar un promedio diario de 2700 kg. de yuca fresca. A continuación se listan en el Cuadro 12 los costos de inversión en infraestructura de todos los sistemas de secado que se han evaluado hasta el momento dentro del marco de trabajo del presente proyecto.

El Cuadro 13 resume y compara los costos de inversión de los sistemas de secado considerados anteriormente y además incluye los consumos de combustible, energía eléctrica y requerimientos de mano de obra.

CUADRO 12. Costos de inversión en infraestructura de varios sistemas de secado con capacidad para procesar 2700 kg. diarios de yuca fresca (costos válidos para 1986)

A) NATURAL EN BANDEJAS INCLINADAS

240 bandejas en hierro	\$ 840,000
Soportes	55,000
700 m ² de terreno	<u>35,000</u>
TOTAL:	\$ 930,000
	=====

B) ARTIFICIAL EN CAPA FIJA POR TANDAS CON UN QUEMADOR DE CARBON

Quemador e intercambiador	\$ 600,000
Unidad motor-ventilador (11500 cfm)	500,000
Cámara de secado (20 m ²)	120,000
Piso concreto (100 m ²)	<u>80,000</u>
TOTAL:	\$1,300,000
	=====

C) MIXTO: NATURAL EN BANDEJAS INCLINADAS Y LUEGO ARTIFICIAL EN CAPA FIJA USANDO UN QUEMADOR DE CARBON

140 bandejas en hierro	\$ 490,000
Soportes	31,000
Terreno (400 m ²)	20,000
Quemador e intercambiador	200,000
Unidad motor-ventilador (3000 cfm)	180,000
Cámara de secado (7 m ²)	42,000
Piso de concreto (35 m ²)	27,000
	<hr/>
TOTAL:	\$ 990,000
	=====

D) ARTIFICIAL EN CAPA FIJA POR TANDA CON UN COLECTOR SOLAR PLANO

Cámara de secado (40 m ²)	\$ 240,000
Unidad motor-ventilador (29000 cfm)	800,000
Colector solar (200 m ²)	350,000
Piso concreto (200 m ²)	150,000
	<hr/>
TOTAL:	\$1,830,000
	=====

E) MIXTO: NATURAL SOBRE BANDEJAS INCLINADAS Y LUEGO ARTIFICIAL EN CAPA FIJA USANDO UN COLECTOR SOLAR PLANO

140 bandejas en hierro	\$ 490,000
Soportes	32,000
Terreno (400 m ²)	20,000
Cámara de secado (16 m ²)	98,000
Colector solar (80 m ²)	140,000
Unidad motor-ventilador (10000 cfm)	450,000
Piso concreto (80 m ²)	60,000
	<hr/>
TOTAL:	\$1,290,000
	=====

En la columna de costo por infraestructura, se destaca el alto valor del sistema artificial que utiliza un colector solar para calentar el aire. El sistema menos costoso, tal como se esperaba, es el natural sobre bandejas inclinadas, que no necesita los costosos equipos de ventilación que emplean los sistemas artificiales.

Reducciones de la inversión en un 30% se logran en los sistemas mixtos que emplean un método natural y uno artificial para deshidratar la yuca fresca; la reducción en el consumo de carbón y energía eléctrica es mucho más notable porque al sistema artificial solo debe extraer una cuarta parte de la humedad y, además, los equipos de ventilación son más pequeños y requieren menos potencia para su funcionamiento.

CUADRO 13. Resumen de los costos de inversión, requerimientos de combustible y mano de obra de varios sistemas de secado con capacidad para procesar 2700 kg. diarios de yuca fresca (costos válidos para 1986)

Sistema	Infra- estructura \$ Col	Consumo ^{a/}		Mano de obra (h.hr)
		Carbón (kg)	Energía eléct. (kwh)	
1 Natural en bandejas inclinadas	930,000	-	-	18.4
2 Capa fija con colector solar	1,830,000	-	161	22.0
3 Mixto solar: bandejas y capa fija	1,290,000	-	31	20.5
4 Capa fija con quemador de carbón	1,300,000	450	70	12.8
5 Mixto con carbón: bandejas y capa fija	990,000	150	10	-
6 Artificial con bandejas super- puestas	1,620,000	720	70	15.0

^{a/} Referido a tonelada de yuca seca con humedad de 12% en b.h. Estos consumos están reajustados para trozos de yuca con un contenido inicial de humedad de 68% (b.h.).

El secado mixto que utiliza un colector solar en la fase artificial merece evaluarse económicamente como alternativa en las épocas secas. A pesar que la inversión es mucho más alta que la del mixto que utiliza un quemador de carbón, no consume combustible para calentar el aire y el costo de energía eléctrica es bajo.

El sistema artificial que utiliza bandejas superpuestas dentro de una cámara exige mucho más combustible porque tiene períodos de baja eficiencia donde solo funcionan una o dos bandejas. Es por esto que, el consumo de 720 kg por tonelada de yuca seca casi dobla al consumo del sistema de capa fija por tanda.

Los requerimientos de mano de obra efectiva en términos de horas-hombres necesarias para llevar a cabo el proceso son semejantes y no existen diferencias tan apreciables, con excepción del valor alto que se presentó con el secado solar, que dobló prácticamente las horas-hombre requeridas con el sistema artificial por lote.

VIII. INFORME PRELIMINAR DE ALGUNOS ENSAYOS DE SECADO SOBRE UN PISO DE CONCRETO MODIFICADO

El nivel de higiene que se alcanza en el secado de yuca sobre pisos de concreto para consumo animal es bajo. El empleo de este sistema de secado natural con el objetivo de producir yuca seca para alimentación humana, implica la realización de algunas modificaciones al mismo diseño del patio.

Hasta el momento se han hecho algunas pruebas preliminares sobre una pequeña area de patio que se diseñó y construyó con el fin de observar el efecto de las modificaciones sobre el desempeño de los operarios y la calidad de los trozos secos producidos (Figura 13).

El patio de secado está conformado por franjas de 3 m de ancho que constituyen la zona de secado, separados entre sí por corredores de 60 cm que se utilizan para la circulación de los operarios en las operaciones de esparcido, volteo y recolección de los trozos de yuca. La superficie de las zonas de secado es bastante lisa y está construída con dos pendientes con el fin de facilitar el lavado y limpieza del patio. Esta area de corredores y pasillos alcanza a representar un 30% del area total, sinembargo, cálculos preliminares de los costos de inversión permiten afirmar que serían semejantes a los costos de un sistema de secado natural sobre bandejas inclinadas.

Los análisis microbiológicos preliminares realizados sobre muestras de trozos de yuca seca indicaron contaminación por bacterias y bacilos, tanto en el sistema de secado con bandejas inclinadas como en el patio modificado, presentándose además, en este último, contaminación por hongos y levaduras con niveles superiores al límite establecido por ICONTEC para harinas de trigo.

El proceso de producción de yuca seca debe evaluarse en forma integral con el fin de identificar las etapas que pueden aportar la contaminación que se detecta en el producto terminado y de esta manera, efec-

tuar las correcciones y modificaciones necesarias para obtener un producto de alta calidad.

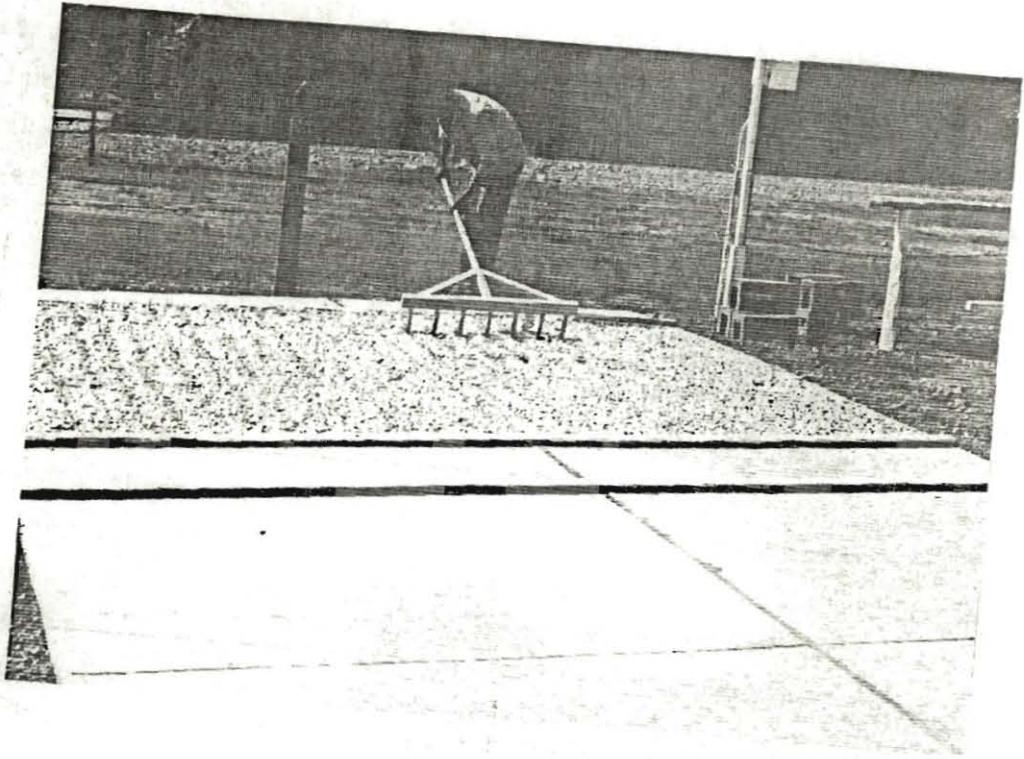


FIGURA 13. Patio de cemento modificado para secado de trozos de yuca.

IX. CONCLUSIONES

1. A pesar que existen diferencias en la forma y el tamaño, los tres tipos de trozos de yuca disponibles se comportan en forma similar, en términos de tiempos de secado, cuando se someten a deshidratación sobre pisos de concreto y artificialmente en capa fija por tandas a 50°C. En el sistema natural sobre bandejas inclinadas, los trozos Tahilandia (tajadas gruesas) demoran mucho más tiempo que los trozos Brasil y Malasia (barras rectangulares y tiras finas respectivamente).
2. Las densidades de carga que permiten realizar el proceso naturalmente en un tiempo total de 32 horas son 16 kg/m² en bandejas inclinadas para los trozos Brasil y Malasia y sólo 12 kg/m² para el trozo Tahilandia. Con relación al secado sobre pisos de concreto, la carga ideal es 10 kg/m² para cualquiera de los trozos bajo las condiciones ambientales de CIAT. Con estas cargas recomendadas se alcanzan a realizar las labores de recolección, empaque adicionalmente al propio secado en dos jornadas completas de trabajo.
3. Las barras rectangulares producidas tanto por la máquina Brasileña como por las cuchillas tipo Colombia, tienen ciertas ventajas con respecto a los otros trozos. Estos trozos presentan menor resistencia a los desplazamientos de la herramienta de mezclado ocasionándose menor daño en el secado artificial de capa fija. Además el secado es más uniforme y parejo, pudiéndose llevar a cabo procesos con cargas de 200 kg por metro cuadrado de lámina perforada sin que el lecho o capa se asiente o compacte. Por las propias características de los trozos tipo Malasia y Tahilandia, solo se deben recomendar cargas máximas de 100 y 150 kg/m² (respectivamente) cuando se realice un secado artificial en capa fija por tandas.
4. El empleo de colectores solares planos para secar artificialmente un producto tan húmedo como la yuca requiere la aplicación de grandes volúmenes de aire para compensar el poco incremento de tem-

peratura conseguida y así detener rápidamente el deterioro de los trozos frescos garantizándose una buena calidad final. Lo anterior, unido a los altos costos de la infraestructura y la total dependencia de las condiciones ambientales, hace que este sistema no pueda competir favorablemente con cualquiera de las modalidades de secado natural que indiscutiblemente son las mejores alternativas para las épocas secas del año por sus bajos costos de inversión y operación.

5. El uso de un secador artificial de capa fija por tandas y carbón mineral como fuente de calor, es una alternativa que hace posible la deshidratación de yuca especialmente en las épocas lluviosas del año.

Con la aplicación de caudales entre 80 y 130 m³/min por tonelada de producto fresco se logran tiempos de secado que se acomodan fácilmente a una jornada de trabajo. Bajo estas condiciones, el sistema funciona con una eficiencia global térmica aceptable que oscila entre 35 y 40%. A pesar que el proceso no es tan eficiente, los costos de operación son bajos comparados con los costos de otros combustibles y el manejo del quemador de carbón es sencillo y requiere poca destreza para controlar la temperatura deseada. Con caudales superiores a 150 m³/min por tonelada de yuca fresca y tiempos de secado menores a 6 horas, la eficiencia global térmica desciende a niveles de 25% y la diferencia de costos entre el carbón mineral y el gas propano se disminuye, por lo que la elección entre ellos debe basarse en la disponibilidad del propio combustible y en los costos de los mismos equipos de combustión y transferencia de calor.

6. La modalidad del sistema mixto que combina el secado natural durante un primer día con el secado artificial en una segunda fase (final) es una opción que reduce efectivamente los costos de secamiento que genera el uso de un sistema enteramente artificial que podría utilizar equipos de ventilación mucho más pequeños. Además, si una planta procesadora dispone tanto del sistema natural

como del artificial independientemente, podría combinarlos en la época seca con el objetivo de duplicar su capacidad de procesamiento y reducir los costos fijos por tonelada de producto seco.

7. El uso de colectores solares incorporados en los techos de las plantas de procesamiento, pueden reducir los costos de operación por combustible en los sistemas artificiales en las épocas secas del año. Este aspecto hace más atractivo el secado mixto solar que a pesar de tener una inversión en infraestructura mucho más alta que el sistema mixto que emplea carbón, no genera costos por combustible y su gasto de energía eléctrica es reducido.
8. El proceso de producción de trozos secos de yuca sin cáscara requiere una operación de lavado y pelado antes del trozamiento de las raíces frescas. El lavado-pelado mecánico no tiene mucha capacidad y el sistema de secado artificial que está conformado por bandejas removibles es una alternativa de secamiento adecuada que haría posible absorber el flujo continuo de trozos frescos producidos en las etapas anteriores del procesamiento; sin embargo, este sistema de secado tiene una infraestructura más costosa que el sistema de capa fija por tandas y su consumo de carbón está alrededor de 700 kg de carbón por tonelada de producto seco.

X. RESEÑA BIBLIOGRAFICA DE LAS INVESTIGACIONES DE SOPORTE ^{a/}

1. Alonso, L.; Best, R.; Ortega, J. 1985. Evaluación de un secador de capa fija acoplado a un colector solar plano (parte II). In _____, comp. Plan piloto para el desarrollo agroindustrial del cultivo de la yuca en algunos departamentos de la Costa Atlántica de Colombia, cuarto informe. Cali, Colombia, Proyecto Cooperativo DRI-CIAT. pp. 72-77 (Bibliografía CIAT).
2. Alonso, L.; Viera, M.A.; Best, R.; Figueroa, F. 1986a. Comparación de tres tipos de trozos de yuca en secado artificial. Artículo sometido para publicación en la Revista ACOGRANOS, que se publicará con motivo de la III Mesa Redonda Latinoamericana sobre prevención de pérdidas post-cosecha de granos, Cali, Colombia, 27-31 de octubre, 1986.
3. Alonso, L.; Viera, M.A.; Best, R. 1986b. La investigación en el secado artificial de yuca como apoyo al desarrollo agroindustrial de la Costa Atlántica de Colombia: evaluación de varias fuentes de calor. In III Mesa Redonda Latinoamericana sobre prevención de pérdidas post-cosecha de granos, Cali, Colombia, 27-31 de octubre de 1986.
4. Best, R.; Alonso, L. 1984. Evaluación de un secador de capa fija acoplado a un colector solar plano (Parte I). In _____, comp. Plan piloto para el desarrollo agroindustrial del cultivo de la yuca en algunos departamentos de la Costa Atlántica de Colombia, tercer informe. Cali, Colombia, Proyecto Cooperativo DRI-CIAT. pp. 89-103 (Bibliografía CIAT).

^{a/} Se incluyen solamente las referencias de los trabajos de investigación que se llevaron a cabo para cumplir con los objetivos del área de secamiento del proyecto de producción y uso de harina de yuca para consumo humano. Las referencias bibliográficas consultadas se consignan en cada uno de los mismos informes que están contenidos en el Anexo I.

5. Best, R.; Alonso, L.; Gómez, A.L. 1986. Procesamiento de la yuca para pequeños productores: Adaptación y mejoramiento de una máquina picadora de yuca para el uso de cooperativas de agricultores. In Conferencia sobre la formación de una Red Regional de mecanización para el pequeño agricultor, Campo Experimental Cotaxtla, Veracruz, Mejico, Noviembre 1986.

6. Castillo, C.A.; Hernández, W. 1985. Estudio del secado natural de tres tipos de trozos de yuca. Tesis de grado, Universidad del Valle y Universidad Nacional de Colombia, Cali, Colombia.