

IICA  
FOI  
34



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
10 JUN 2004  
LIBRE

**PRIMER INFORME DEL PROYECTO:**

**"EVALUACION DE LAS VARIABLES DE SECADO PARA LA CONSERVACION DE LAS  
HOJAS DE LA PLANTA DE AÑIL (*Indigofera Sp.*)"**

**ELABORADO POR:**

**ING. TANIA TORRES RIVERA. En representación de la Escuela de Ingeniería Química  
de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador**

00006870

11CA  
FOI  
34

## **1.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

El empleo de la planta de añil principalmente para la producción de un colorante en polvo de carácter orgánico, ha tenido un gran impulso a nivel nacional en los últimos años.

En El Salvador, la época de cosecha de la planta de añil se realiza entre los meses de Octubre a Enero de cada año, incluso si la plantación es de dos años, cuando se le hacen dos cortes, el primer corte se hace en agosto y el segundo en octubre, lo que permite la extensión del período de cosecha de la planta de Agosto a Enero de cada año. En algunos lugares del país se reactiva, durante este período de cosecha, el proceso artesanal de producción de colorante de añil, en donde, luego de la recolección de la materia prima (hojas ó follaje) esta es trasladada *directamente* hacia el obraje.

Estas condiciones de manejo son una limitante para la agroindustria de la planta de añil, pues no se dispone de materia prima fresca durante seis a ocho meses en el año (aproximadamente), impidiendo con ello, la satisfacción de la demanda en el mercado internacional, ya sea de las hojas o bien del colorante de índigo en polvo que es posible obtener a partir de ellas.

Lo anterior permite considerar la gran importancia que tiene el estudio de procesos de conservación de la hoja de la planta de añil. Un primer enfoque de este tipo de estudios debe ser la evaluación del efecto que, diferentes procesos de conservación de las hojas de la planta de añil tienen en cuanto a la calidad de las mismas como en la del colorante que es posible extraerles, permitiendo así, dar un gran paso para que las hojas de la planta de añil puedan estar disponibles en excelentes condiciones y ser utilizadas y/o procesadas durante todo el año, abriendo con ello, posiblemente, nuevos mercados y campos de comercialización de la planta.

Uno de los métodos de conservación de las hojas de la planta de añil que sería más conveniente considerar, en función de los usos a los que esta puede destinarse, es *el secado*.



Según Lima, et. al. En su trabajo de graduación titulado "Optimización del procesamiento de la planta de añil" (2002). El rendimiento en porcentaje de indigotina del colorante obtenido por el procesamiento de la planta de añil aumentaba cuando se usaba hoja fresca, sin embargo, dados los objetivos fundamentales de dicho trabajo no se estudiaron ni caracterizaron formalmente distintas alternativas de secado de la hoja y esta se secó de manera no controlada.

En la presente investigación se tratará de definir si realmente al someter a las hojas de la planta de añil a procesos de secado controlados se producen efectos sobre la calidad del colorante obtenido (mediante el proceso tradicional de extracción) en términos del porcentaje en peso del polvo obtenido y el porcentaje de indigotina.

Por otra parte, se generará información valiosa sobre la caracterización de diferentes procesos de secado al que pueden someterse las hojas de la planta de añil.

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo principal de esta investigación es:

"Caracterizar procesos de secado para las hojas de la planta de añil (*Indigofera Sp.*) y evaluar el efecto de los factores de estos procesos sobre las características de calidad del colorante que puede producirse a partir de la planta".

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Entre los objetivos específicos se encuentran:

1. Caracterizar y comparar diferentes procesos de secado para la conservación de las hojas de la planta de añil (*Indigofera Sp.*).





2. Estudiar la relación en función de los tipos de secado, entre el tiempo de secado y el porcentaje de humedad de la hoja de la planta de añil con las características de calidad del colorante que puede extraerse como son el % de indigotina y el rendimiento en peso del polvo obtenido.
3. Comparar y diferenciar el efecto de diferentes procesos de secado sobre hojas provenientes de las dos especies de planta de añil mayormente propagadas en el país como son la Indigófera guatemalénsis y la Indigófera Sufructicosa.

### **1.3 ALCANCES**

Los alcances esperados del proyecto son los siguientes:

1. Informe sobre las variables y el rango de valores de las mismas que afectan el proceso de secado de la hoja de la planta de añil, que permitan conservar el poder tintóreo del colorante obtenido.
2. Propuesta del proceso de secado más adecuado para la conservación de la hoja de planta de añil (Indigofera Sp.).

### **1.4 LIMITACIONES**

Dentro de las limitaciones de la investigación se encuentran:

1. La información actualizada y/o estudios específicos sobre el secado de la hoja de la planta de añil en el país es inexistente.



2. La selección de los procesos de secado a ensayar se hará de acuerdo a los recursos disponibles (equipos, materiales, tiempo de realización del proyecto entre otros).

## **2.0 DESCRIPCION DE LOS PROCESOS DE SECADO DE PLANTAS**

Como ya se mencionó, la alternativa de conservación de la hoja de la planta de añil que se tratará en este estudio, es el secado.

El secado es uno de los métodos más antiguos utilizados por el hombre para la conservación de diversos materiales orgánicos e inorgánicos. Es un proceso copiado de la naturaleza; sin embargo se han mejorado ciertas características de la operación. El secado es el método de conservación de plantas mas ampliamente usado. Es importante señalar que todos los métodos de secado se han ido desarrollando debido a que resultaban convenientes o aceptables para determinadas condiciones de los materiales y ambientales. El secado suele ser la etapa final de los procesos antes del empaque y permite que muchos materiales, como los jabones en polvo y los colorantes, sean más adecuados para su manejo.

En general, el secado consiste en la reducción del contenido de humedad de la materia mediante el aumento en la temperatura del producto (con aire caliente, resistencias, radiación, etc.), el cual responde liberando vapor de agua desde su superficie y parte interior; el vapor a su vez es removido por el aire o medio que rodea al producto. De manera que se dan dos procesos: intercambio o transferencia de calor, e intercambio o transferencia de masa. El contenido de humedad en el producto seco final varía ya que depende del tipo de producto.

Los métodos y procesos de secado pueden clasificarse de diferentes maneras. Estos procesos pueden dividirse por *lotes* cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un periodo de tiempo, o *continuos*, donde el material se añade sin interrupción al equipo de secado y se obtiene material seco con



régimen continuo. Los procesos de secado pueden clasificarse también de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer el vapor de agua:

(1) En la primera categoría, el calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire.

(2) En el secado al vacío, la evaporación del agua se verifica con mayor rapidez a presiones bajas y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación (también pueden usarse temperaturas bajas con vacío para ciertos materiales que pueden decolorarse o descomponerse a temperaturas altas).

(3) en el secado por congelación, el agua se sublima directamente del material congelado.

Una forma gráfica de representar el proceso de secado es mediante curvas de contenido de humedad del producto con respecto al tiempo. Estas curvas, a veces llamadas cinéticas de secado son útiles para determinar las condiciones óptimas de secado (temperatura, humedad relativa, velocidad del aire, tiempo de secado), condiciones que luego pueden ser usadas en el proceso comercial del producto para garantizar una calidad homogénea. En la figura 2.1 se esquematiza una curva de secado.

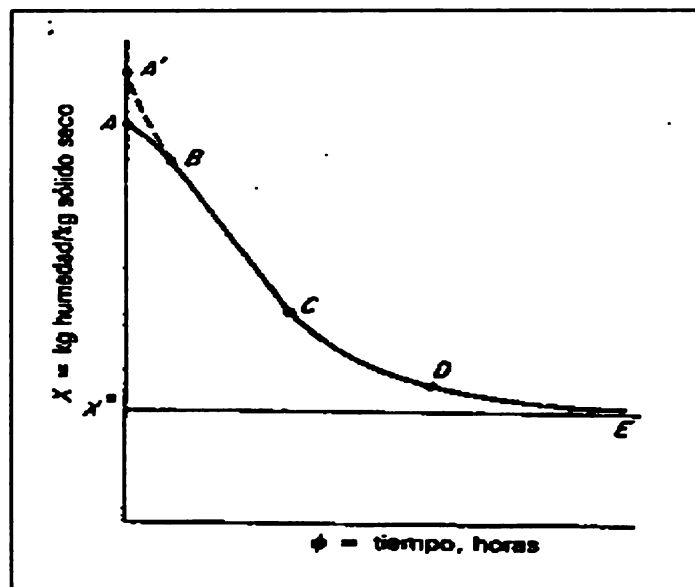


FIGURA 2.1 ESQUEMA GENERAL DE UNA CURVA DE SECADO

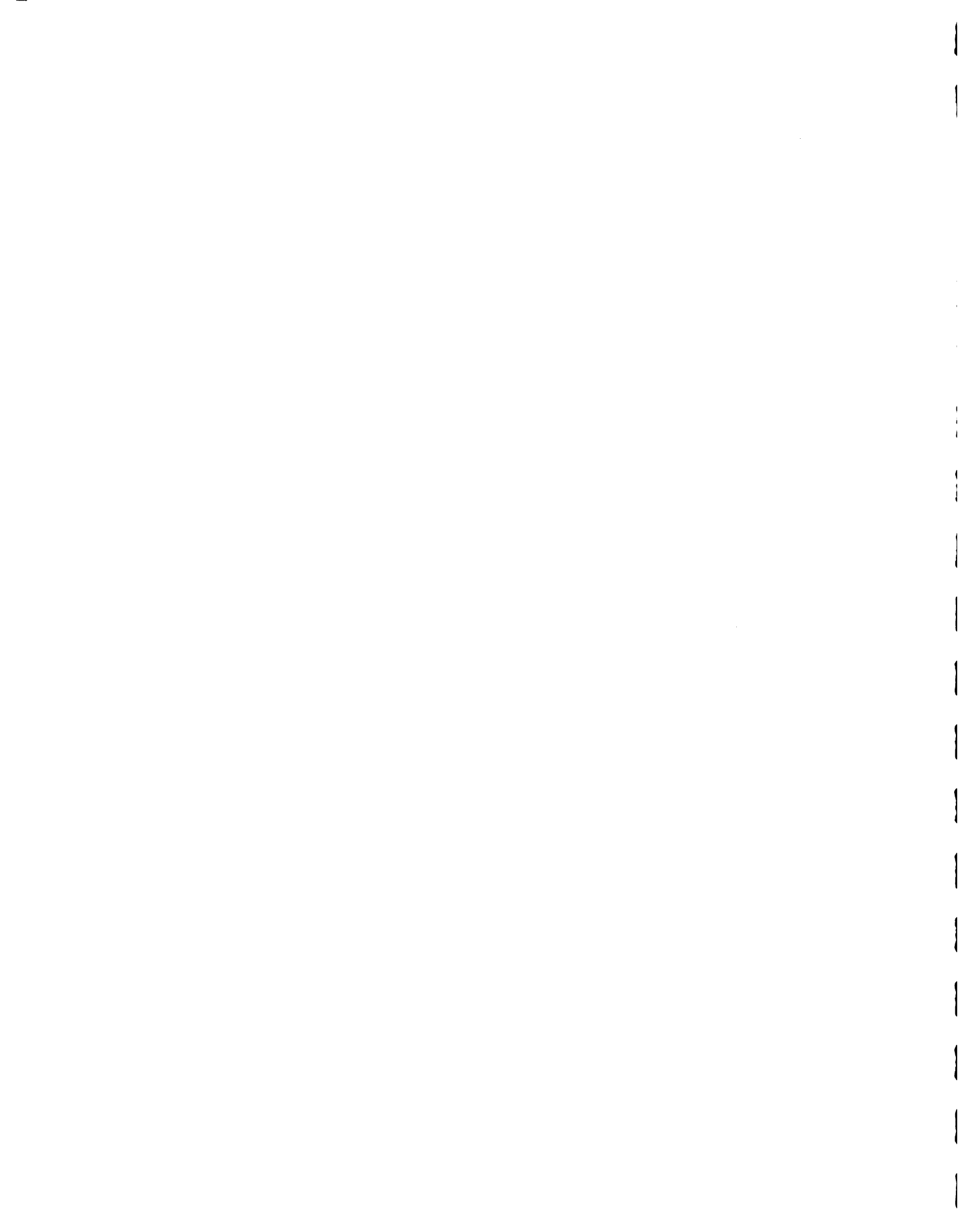
1  
1  
1  
1  
1

## 2.1 CONSERVACION POR SECADO DE PLANTAS Y HIERBAS

La razón más importante desde el punto de vista técnico por la que se secan las hierbas es su conservación; por este método se promueve el mantenimiento de los componentes del vegetal fresco y se evita la proliferación de microorganismos. También hay aspectos comerciales, ya que la desecación debe llevarse a cabo en las mejores condiciones para que las hierbas no pierdan las características de calidad que deben presentar, lo cual se consigue muchas veces no superando ciertos valores de la cantidad de agua extraída, y controlando adecuadamente los procesos de secado. En general, en el comercio existen valores establecidos de contenido de humedad para cada hierba o sus partes. Por ejemplo, los datos presentados en la tabla 2.1, son algunos valores para contenido de humedad de algunas hierbas, exigidos por Alemania para importar a ese país, aunque las empresas compradoras pueden exigir otros valores distintos.

**TABLA 1. CONTENIDO DE HUMEDAD DE ALGUNAS HIERBAS PARA SU COMERCIALIZACION**

<b>HIERBA</b>	<b>HUMEDAD MAXIMA</b>
Albahaca dulce	10%
Laurel hojas	9 %
Eneldo	10%
Mejorana	10%
Orégano	11%
Romero	9 %
Salvia	10%
Ajedrea	12%
Estragón	10%
Tomillo	9 %





## **2.2 SISTEMAS DE SECADO PARA PLANTAS Y HIERBAS**

Cada producto reclama una desecación diferente, no solamente por la cantidad de agua que contiene, sino por las características de calidad que deben presentar; las hierbas y las hojas deben secarse por lo común a temperatura moderada, en presencia de una cantidad grande de agua; las raíces, cortezas y rizomas pueden desecarse a temperaturas algo mayores.

Existe una gran variedad de sistemas de secado para plantas, con diferentes niveles tecnológicos, cada uno con sus ventajas y limitantes. Para el diseño y selección de un sistema de secado eficiente, se deben tomar en cuenta las características deseables para el producto final (apariencia, color, sabor, aroma, textura, atributos de calidad, sanidad).

El éxito de un sistema de secado depende de una buena transferencia de masa y de calor en el secador. Para ello la transferencia de calor debe ser eficiente, y se debe mantener un gradiente de temperatura entre el medio desecante (aire) y el agua que se evapora. Por su parte, para garantizar la eficiencia del proceso de transferencia de masa, debe siempre haber un gradiente de presiones de vapor (humedad relativa) entre el aire de secado y el lugar del producto donde ocurre la evaporación. La migración del vapor del agua, las curvas de velocidad de secado y la actividad de agua, no restringen la eficiencia del secado, a menos que la migración se vea impedida por la formación de costras que restrinjan el paso del agua a través del producto.

Los sistemas de secado para plantas y hierbas se clasifican, en sistemas de secado natural y en sistemas de secado mecánico. En las secciones de la 2.2.1 a la 2.2.2, se presenta una descripción general de estos sistemas para plantas y componentes vegetales.



### **2.2.1 SECADO NATURAL**

Si se cuenta con condiciones climáticas adecuadas, humedad relativa baja y temperaturas elevadas, el secado natural requiere poco gasto y es sencillo de realizar.

**a) SECADO AL SOL:** El simple secado al sol es el método más usado en el mundo. En algunos países, los cultivos se secan extendiéndolos sobre los caminos, en las playas o en los techos de las casas, aprovechando el calor absorbido por estas superficies. Muchas veces se usan las rocas planas con el mismo propósito. Con frecuencia el material se coloca sobre esteras, lo que contribuye a reducir la contaminación causada por el polvo y facilita la manipulación.

Estos simples métodos de secado tienen algunas ventajas:

- Prácticamente no requieren de ningún costo adicional, ya que no utilizan combustible.
- No necesitan estructuras permanentes, lo que permite que después de la estación de secado, el terreno quede disponible para la agricultura o para otros fines.

Pero también tienen muchas limitaciones:

- La pérdida de humedad puede no ser constante, ya que depende del clima.
- El secado es muy lento y a menudo el producto no llega a secarse completamente en un solo día, por lo que debe permanecer expuesto durante toda la noche para finalizar su secado al día siguiente. Esto aumenta el riesgo de deterioro, en especial debido al desarrollo de hongos.
- Los niveles finales de humedad que se alcanzan no son lo suficientemente bajos, lo que aumenta las posibilidades de deterioro del producto durante el almacenado. En



otras ocasiones, el producto alcanza niveles de secado superiores a los límites recomendables.

- El producto está expuesto a la contaminación por el polvo y la suciedad y a la infestación por insectos.
- Al permanecer a la intemperie puede ser dañado o hurtado por las aves u otros animales.
- En el caso de cultivos a granel, como los cereales, se necesita mucho terreno para colocar el grano.
- Se requiere de mano de obra adicional para extender el grano, voltearlo y recogerlo cuando hay riesgo de lluvia.
- Las hierbas pueden adquirir un color oscuro y el nivel de ciertos principios activos, puede disminuir por la exposición directa al sol (este riesgo es mayor en algunos productos que en otros). El simple secado al sol se aplica a una amplia gama de productos tales como el pescado, la carne, los cereales, las menestras, las frutas, los vegetales y las raíces comestibles.

**b) SECADO A LA SOMBRA:** En algunos países, particularmente en aquellos de clima seco y con períodos de fuertes vientos, algunas de las limitaciones mencionadas pueden superarse por medio del secado a la sombra, utilizando los aleros de las viviendas, los balcones o cobertizos contruidos especialmente. Así no hay tantas posibilidades de que el producto se oscurezca, se decolore o pierda sus principios activos, y está protegido de la lluvia. Sin embargo, el secado a la sombra es un proceso lento, por lo que el producto está más expuesto al desarrollo de hongos. Las hierbas se secan sin lavar, atadas en pequeños ramos y colgadas boca abajo. Hay que tener cuidado de que no se toquen unas a otras. Ejemplos comunes de secado a la sombra incluyen vegetales de hoja, algunas hierbas y especias y el secado final del maíz.



c) **SECADORES SOLARES:** Este sistema es ligeramente mejor que el secado por exposición directa al sol. Se utilizan estructuras con superficies que captan la radiación del aire y calientan el aire, que luego está en contacto con el producto. La circulación del aire puede ser natural o con ventiladores (forzada); en este último caso la eficiencia del secado aumenta considerablemente. El calentamiento del aire ayuda a tener una temperatura más uniforme durante el secado, pero la eficiencia de esos secadores depende de las condiciones climáticas, por lo que la temperatura sólo es parcialmente controlada. Al igual que en el caso del secado por exposición directa al sol, se pierden muchos de los atributos de calidad del producto. El uso de secadores solares tiene más ventajas que el secado al sol, por las siguientes razones:

- Las temperaturas son más elevadas y, en consecuencia, los grados de humedad son menores. Esto trae como resultado un secado más rápido y una humedad final menor.
- Las temperaturas elevadas que se generan actúan como una barrera contra la presencia de insectos y el desarrollo de moho.
- El producto dentro de la secadora está protegido del polvo y los insectos.
- El ritmo de secado es más acelerado, y debido a su sistema de rejillas requiere de menor cantidad de terreno para extender el cultivo.
- Permite un grado considerable de protección contra la lluvia, lo que hace innecesaria mano de obra adicional para recoger el material.
- Resulta comparativamente más barato de construir y no necesita mano de obra especializada.

### **2.2.2 SECADO MECÁNICO**

El secado artificial o mecánico determina mayores gastos pero tiene mayores ventajas, pues al controlarse las variables del tratamiento, es posible obtener en el lapso de unas horas, un producto homogéneo y de buena calidad comercial. Hay





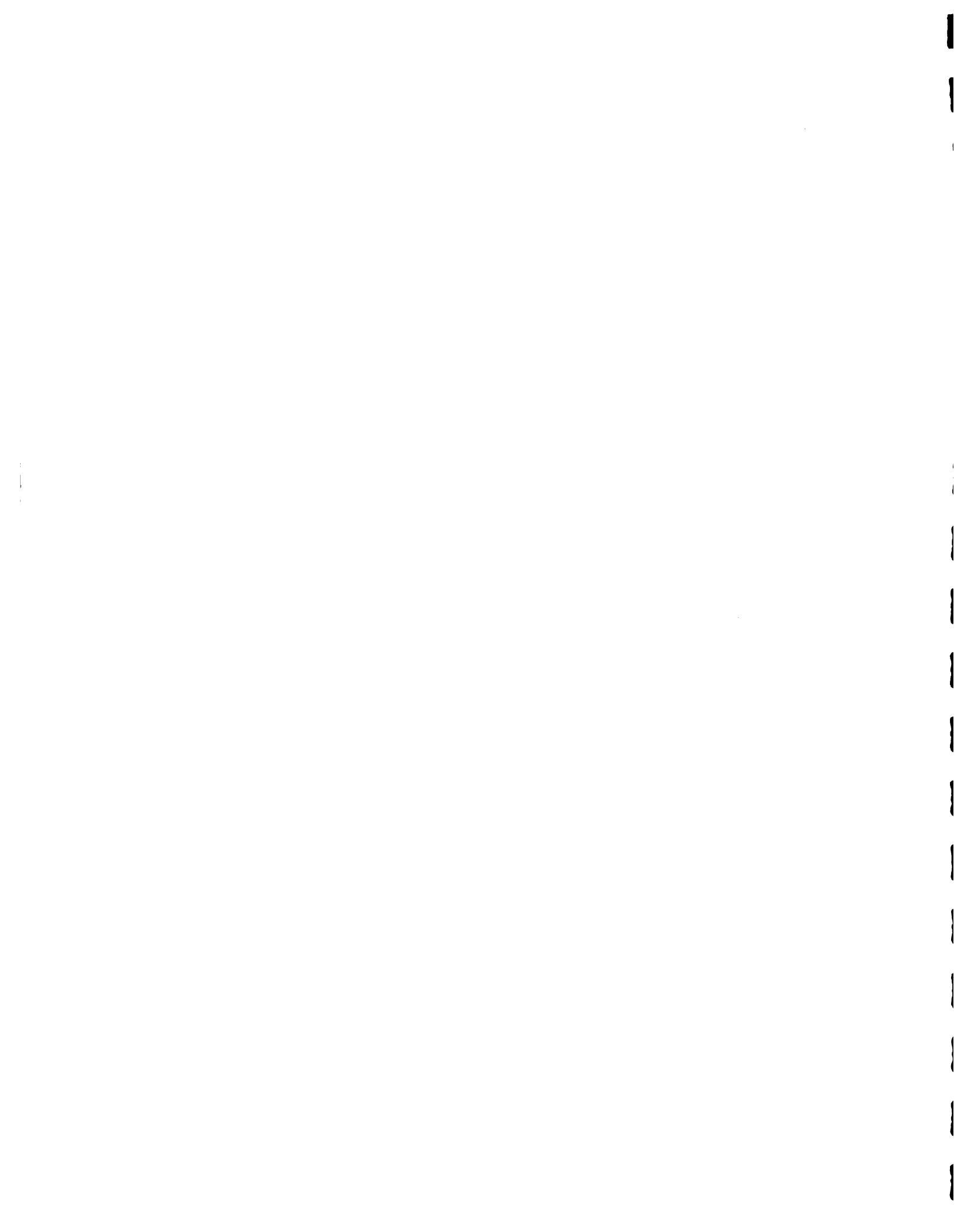
diversos métodos mecánicos para deshidratar las hierbas, que pueden clasificarse, entre otras formas, de la siguiente manera:

- a) *Desecación por aire caliente.*
- b) *Desecación por contacto directo con una superficie caliente.*
- c) *Desecación por aporte de energía de una fuente radiante de microondas o dieléctrica.*
- d) *Liofilización.*

De ellos, el más utilizado es la aplicación de una corriente de aire caliente. La mayoría de los secadores de este tipo incorporan un quemador con un intercambiador de calor y un ventilador que permite la circulación de aire a través del producto. Por lo general, se les adapta un termostato para controlar la temperatura del aire. Los tipos más comunes incluyen *las secadoras de bandejas* (donde el aire caliente pasa a través de una serie de bandejas que contienen el producto); *las secadoras rotativas*, en donde el producto se coloca en un tambor rotativo a través del cual circula el aire; y a mayor escala, las secadoras de túnel, donde pequeños coches con las bandejas pasan a través de éste. Si se usa un quemador a gas y el equipo está bien instalado, normalmente no se requiere incorporar un intercambiador de calor. Si bien estas secadoras accionadas a electricidad son más costosas, ofrecen grandes ventajas entre las cuales se encuentran:

- Buen grado de control sobre el proceso.
- Total independencia de las variaciones climáticas locales.
- Producto final de superior calidad.

**a) SECADOR DE CABINA, BANDEJAS O COMPARTIMIENTOS:** Es un secador discontinuo, que esencialmente consiste en una cabina aislada provista interiormente de un ventilador para circular aire a través de un calentador; el aire caliente sale por



una rejilla de láminas ajustables y es dirigido, bien, horizontalmente entre bandejas cargadas de hierba, o bien, verticalmente a través de las bandejas perforadas y el producto. Estos secadores pueden disponer de reguladores para controlar la velocidad de aire nuevo y la cantidad de aire de recirculación. Los calentadores del aire pueden ser quemadores directos de gas, serpentines calentados por vapor o, en los modelos más pequeños, calentadores de resistencia eléctrica.

Por lo común, en los sistemas de cabina se utilizan velocidades de aire, para los de flujo transversal, de 2 a 5 m/s, y en los de flujo ascendente de 0.5 a 1.25 m<sup>3</sup>/s/m<sup>2</sup> de bandeja.

Los secadores de cabina resultan relativamente baratos de construcción y de mantenimiento y son muy flexibles.

Para algunos productos, para los cuales la temperatura afecta considerablemente sus atributos de calidad (aromas, aceites esenciales, color, etc.), se utilizan equipos similares pero que funcionan bajo una presión de vacío, con lo cual se logra una mejor uniformidad del secado, el producto se puede deshidratar en un menor tiempo y la calidad del producto será mejor.

El uso de estos secadores puede ser apropiado para la producción en pequeña escala de hierbas y especias, pero deben hacerse ensayos para determinar las condiciones ideales del secado, de tal forma que no provoquen la pérdida excesiva de los atributos de calidad.

**b) SECADOR DE TÚNEL:** Permiten desecar en forma semicontinua con una gran capacidad de producción. Consiste en un túnel que puede tener hasta un poco más de 20 m de longitud con una sección transversal rectangular de, mas o menos, hasta 2 por 2 m.

El producto a secar se extiende en capas uniformes sobre bandejas de malla metálica, listones de madera, etc. Las bandejas se apilan sobre carros o vagonetas dejando espacios entre las bandejas para que pase el aire de desecación. Las vagonetas cargadas se introducen de una en una, a intervalos adecuados, en el túnel



de desecación. A medida que se introduce una carretilla por el extremo "húmedo" del túnel se retira otra carretilla de producto seco por el "extremo seco". El aire se mueve mediante ventiladores que lo hacen pasar a través de calentadores y luego fluye horizontalmente entre las bandejas, aunque también se produce cierto flujo a través de las mismas. Normalmente se emplean velocidades del aire del orden de 2.5 a 6.0 m/s.

Los túneles de desecación suelen clasificarse basándose en la dirección relativa del movimiento del producto y del aire:

i) SECADOR DE TÚNEL CONCURRENTE: Las principales características de esta clase de túnel son: 1) Las direcciones de la corriente del aire y del producto en desecación son las mismas. 2) Permite alcanzar elevadas velocidades de evaporación inicial debido a que pueden utilizarse temperaturas del aire relativamente altas sin riesgo de sobrecalentar el producto. 3) A medida que el producto avanza a lo largo del túnel se va poniendo en contacto con aire cada vez más frío, por lo cual se evita que el calor dañe al producto. 4) Es difícil conseguir contenidos en humedad muy bajos debido a que al final del túnel las condiciones de desecación son pobres.

ii) SECADOR DE TÚNEL CONTRACORRIENTE: Las direcciones de la corriente del aire y del producto en desecación son contrarias. Las principales características de esta clase de túnel son: 1) La velocidad de desecación es relativamente pobre en la parte inicial del túnel; 2) Las condiciones en el final de túnel (aire seco y caliente) permiten conseguir contenidos de humedad bajos, pero existe el riesgo de sobrecalentamiento del material vegetal; 3) Este sistema es generalmente más económico en el uso del calor que el concurrente.

Estos sistemas pueden combinarse para lograr mejor control de las variables. La combinación más empleada consta de un túnel primario concurrente seguido de un túnel secundario a contracorriente. Las ventajas son que se consigue una acabado



más rápido y un contenido de humedad final bajo.

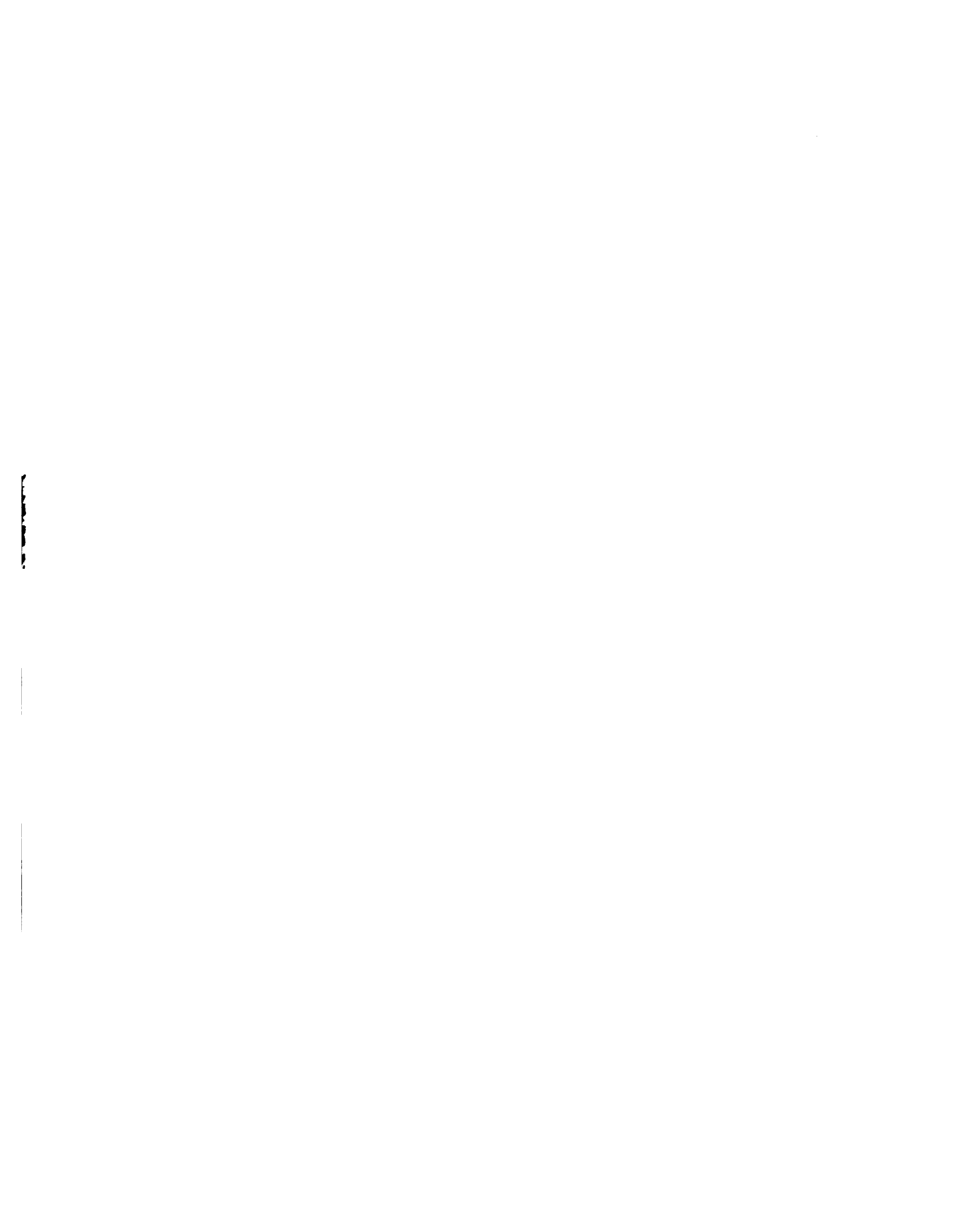
### **2.2.3 SECADO EN HORNOS DE MICROONDAS**

El secado en hornos de microondas ha demostrado ser efectivo para ciertos productos. Tiene como principal atributo, que el secado se hace rápidamente, y generalmente, el color se mantiene mejor. Sin embargo, como en casi todos los procesos de conservación de productos, ocurren pérdidas de sus atributos de calidad. La velocidad del secado depende de la potencia de operación del horno, la cantidad de producto y el tipo de producto. Para algunas hierbas los tiempos de secado se pueden disminuir considerablemente, pero los aceites esenciales parecen verse más afectados por este proceso que por el secado convencional con aire forzado (Ej.: perejil, romero).

### **2.3 CRITERIOS A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO O SELECCIÓN DE UN SECADOR PARA HIERBAS.**

Para poder conservar los atributos de calidad de estos productos como son sabor, olor, alto contenido de aceites esenciales y principios activos, las condiciones de secado deben ser leves en lo que se refiere a temperatura de secado y velocidad del aire, puesto que si esas variables se mantienen con niveles altos, se favorece la pérdida de esos componentes. La temperatura también puede causar un efecto negativo en el color de algunas especias como la cúrcuma.

Para hierbas varios autores recomiendan el secado con aire caliente a temperaturas cercanas a 35 °C, en secadores de gabinete o túnel, manteniendo velocidades de aire moderadas (0.5 a 1.0 m/s). Para aplicaciones pequeñas se recomienda el secado al aire libre, en un lugar sombreado (sin exponer directamente al sol) y ventilado. Para esas condiciones, y con el equipo adecuado, el secado puede realizarse en unas pocas horas. La literatura no menciona nada respecto a la humedad relativa del aire,





pero vale la pena destacar que si las condiciones ambientales tienen una alta humedad relativa, y se usan temperaturas bajas, la deshidratación va a ser más lenta, por lo cual sería ideal que el secador se ubicara en un lugar fresco y seco del edificio.

Si se cuenta con un deshidratador, se deben hacer unas pruebas iniciales para determinar los tiempos de secado y la calidad final del producto usando distintas cantidades de producto y variando ligeramente las condiciones de temperatura y velocidad del aire. Estas pruebas permitirán identificar los niveles óptimos de estas variables y asegurar un producto final uniforme.

Similarmemente, si el secado se hace de forma natural, se deben correr algunas pruebas para determinar los criterios que indicarán el momento de finalizar el secado.

### **3.0 PLANIFICACION DEL PROCESO DE INVESTIGACION EXPERIMENTAL**

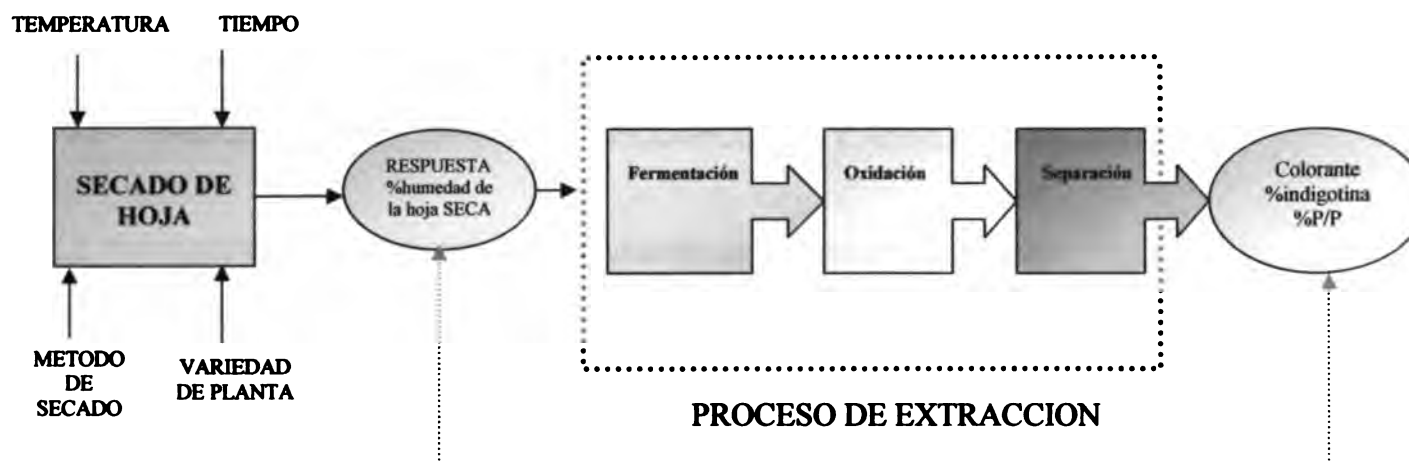
Como ya se mencionó, esta investigación consiste en el estudio del comportamiento de las características de calidad del colorante en polvo obtenido a partir del procesamiento de las hojas de la planta de añil de las variedades *Indigófera guatemelensis* e *Indigófera suffruticosa*, cuando estas son secadas previamente a su procesamiento para la extracción del colorante.

En general, los objetivos que guían la etapa experimental son:

- I. Determinar si influye el uso de hoja seca en las características del colorante de añil.
- II. Determinar si la posible influencia del uso de hoja seca en las características de calidad del colorante es función de la variedad de la planta y del método de secado empleado.

En la figura 3.1, se presenta el esquema del proceso de obtención de información.





**FIGURA 3.1 ESQUEMA DEL PROCESO RECOLECCION Y ANALISIS DE DATOS**

La metodología a seguir para cumplir con los objetivos de la investigación será:

1. Estudiar, diferenciando para las dos especies de planta y para los tres métodos de secado empleados, el efecto del uso de hoja seca sobre el comportamiento de las características de calidad del polvo del colorante extraído. Los métodos de secado a emplear son:
  - a. Secado en estufa sin circulación de aire
  - b. Secado solar
  - c. Secado en secador de bandejas

(El control y registro del proceso de secado dependerá del tipo de método empleado).

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100

2. Comparar los tres métodos de secado mediante su efecto sobre las características de calidad del colorante.

#### **4.0 PROCESO EXPERIMENTAL: RECOLECCION Y ANALISIS DE DATOS**

La investigación experimental está compuesta de las siguientes etapas:

- 1) Investigación bibliográfica de los procesos de secado y del método de extracción del colorante.
- 2) Determinación de los métodos de medición de las variables indicadoras del proceso de secado y de las características de calidad del colorante.
- 3) Recolección y análisis de datos cuando se usa hoja seca obtenida por el método de secado en estufa sin circulación de aire.
- 4) Recolección y análisis de datos cuando se usa hoja seca obtenida por el método de secado solar.
- 5) Recolección y análisis de datos cuando se usa hoja seca obtenida por el método de secado en secador de bandejas con circulación de aire.
- 6) Comparación de los métodos de secado.
- 7) Conclusiones y recomendaciones.

El estudio del efecto del grado de secado de las hojas sobre las características de calidad del colorante se hará, para los tres tipos de secado, mediante la extracción del colorante contenido en 50 gramos de hoja que serán tomados como submuestras de las cuatro libras de hoja que se encuentran en el proceso de secado. Estas submuestras serán seleccionadas al azar en cada punto del intervalo de tiempo considerado para la duración del proceso de secado.

A continuación se detalla el desarrollo de las distintas etapas.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100  
101  
102  
103  
104  
105  
106  
107  
108  
109  
110  
111  
112  
113  
114  
115  
116  
117  
118  
119  
120  
121  
122  
123  
124  
125  
126  
127  
128  
129  
130  
131  
132  
133  
134  
135  
136  
137  
138  
139  
140  
141  
142  
143  
144  
145  
146  
147  
148  
149  
150  
151  
152  
153  
154  
155  
156  
157  
158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171  
172  
173  
174  
175  
176  
177  
178  
179  
180  
181  
182  
183  
184  
185  
186  
187  
188  
189  
190  
191  
192  
193  
194  
195  
196  
197  
198  
199  
200  
201  
202  
203  
204  
205  
206  
207  
208  
209  
210  
211  
212  
213  
214  
215  
216  
217  
218  
219  
220  
221  
222  
223  
224  
225  
226  
227  
228  
229  
230  
231  
232  
233  
234  
235  
236  
237  
238  
239  
240  
241  
242  
243  
244  
245  
246  
247  
248  
249  
250  
251  
252  
253  
254  
255  
256  
257  
258  
259  
260  
261  
262  
263  
264  
265  
266  
267  
268  
269  
270  
271  
272  
273  
274  
275  
276  
277  
278  
279  
280  
281  
282  
283  
284  
285  
286  
287  
288  
289  
290  
291  
292  
293  
294  
295  
296  
297  
298  
299  
300  
301  
302  
303  
304  
305  
306  
307  
308  
309  
310  
311  
312  
313  
314  
315  
316  
317  
318  
319  
320  
321  
322  
323  
324  
325  
326  
327  
328  
329  
330  
331  
332  
333  
334  
335  
336  
337  
338  
339  
340  
341  
342  
343  
344  
345  
346  
347  
348  
349  
350  
351  
352  
353  
354  
355  
356  
357  
358  
359  
360  
361  
362  
363  
364  
365  
366  
367  
368  
369  
370  
371  
372  
373  
374  
375  
376  
377  
378  
379  
380  
381  
382  
383  
384  
385  
386  
387  
388  
389  
390  
391  
392  
393  
394  
395  
396  
397  
398  
399  
400  
401  
402  
403  
404  
405  
406  
407  
408  
409  
410  
411  
412  
413  
414  
415  
416  
417  
418  
419  
420  
421  
422  
423  
424  
425  
426  
427  
428  
429  
430  
431  
432  
433  
434  
435  
436  
437  
438  
439  
440  
441  
442  
443  
444  
445  
446  
447  
448  
449  
450  
451  
452  
453  
454  
455  
456  
457  
458  
459  
460  
461  
462  
463  
464  
465  
466  
467  
468  
469  
470  
471  
472  
473  
474  
475  
476  
477  
478  
479  
480  
481  
482  
483  
484  
485  
486  
487  
488  
489  
490  
491  
492  
493  
494  
495  
496  
497  
498  
499  
500  
501  
502  
503  
504  
505  
506  
507  
508  
509  
510  
511  
512  
513  
514  
515  
516  
517  
518  
519  
520  
521  
522  
523  
524  
525  
526  
527  
528  
529  
530  
531  
532  
533  
534  
535  
536  
537  
538  
539  
540  
541  
542  
543  
544  
545  
546  
547  
548  
549  
550  
551  
552  
553  
554  
555  
556  
557  
558  
559  
560  
561  
562  
563  
564  
565  
566  
567  
568  
569  
570  
571  
572  
573  
574  
575  
576  
577  
578  
579  
580  
581  
582  
583  
584  
585  
586  
587  
588  
589  
590  
591  
592  
593  
594  
595  
596  
597  
598  
599  
600  
601  
602  
603  
604  
605  
606  
607  
608  
609  
610  
611  
612  
613  
614  
615  
616  
617  
618  
619  
620  
621  
622  
623  
624  
625  
626  
627  
628  
629  
630  
631  
632  
633  
634  
635  
636  
637  
638  
639  
640  
641  
642  
643  
644  
645  
646  
647  
648  
649  
650  
651  
652  
653  
654  
655  
656  
657  
658  
659  
660  
661  
662  
663  
664  
665  
666  
667  
668  
669  
670  
671  
672  
673  
674  
675  
676  
677  
678  
679  
680  
681  
682  
683  
684  
685  
686  
687  
688  
689  
690  
691  
692  
693  
694  
695  
696  
697  
698  
699  
700  
701  
702  
703  
704  
705  
706  
707  
708  
709  
710  
711  
712  
713  
714  
715  
716  
717  
718  
719  
720  
721  
722  
723  
724  
725  
726  
727  
728  
729  
730  
731  
732  
733  
734  
735  
736  
737  
738  
739  
740  
741  
742  
743  
744  
745  
746  
747  
748  
749  
750  
751  
752  
753  
754  
755  
756  
757  
758  
759  
760  
761  
762  
763  
764  
765  
766  
767  
768  
769  
770  
771  
772  
773  
774  
775  
776  
777  
778  
779  
780  
781  
782  
783  
784  
785  
786  
787  
788  
789  
790  
791  
792  
793  
794  
795  
796  
797  
798  
799  
800  
801  
802  
803  
804  
805  
806  
807  
808  
809  
810  
811  
812  
813  
814  
815  
816  
817  
818  
819  
820  
821  
822  
823  
824  
825  
826  
827  
828  
829  
830  
831  
832  
833  
834  
835  
836  
837  
838  
839  
840  
841  
842  
843  
844  
845  
846  
847  
848  
849  
850  
851  
852  
853  
854  
855  
856  
857  
858  
859  
860  
861  
862  
863  
864  
865  
866  
867  
868  
869  
870  
871  
872  
873  
874  
875  
876  
877  
878  
879  
880  
881  
882  
883  
884  
885  
886  
887  
888  
889  
890  
891  
892  
893  
894  
895  
896  
897  
898  
899  
900  
901  
902  
903  
904  
905  
906  
907  
908  
909  
910  
911  
912  
913  
914  
915  
916  
917  
918  
919  
920  
921  
922  
923  
924  
925  
926  
927  
928  
929  
930  
931  
932  
933  
934  
935  
936  
937  
938  
939  
940  
941  
942  
943  
944  
945  
946  
947  
948  
949  
950  
951  
952  
953  
954  
955  
956  
957  
958  
959  
960  
961  
962  
963  
964  
965  
966  
967  
968  
969  
970  
971  
972  
973  
974  
975  
976  
977  
978  
979  
980  
981  
982  
983  
984  
985  
986  
987  
988  
989  
990  
991  
992  
993  
994  
995  
996  
997  
998  
999  
1000

#### **4.1 PROCESO DE EXTRACCION DEL COLORANTE**

La extracción del colorante en polvo de las hojas de la planta de añil se efectuó simulando en el laboratorio las etapas de producción que se llevan a cabo en la mayoría de los obrajes del país. Dicho proceso de extracción del colorante, fue el mismo independientemente del método empleado para el secado de la hoja.

Los parámetros y el control del proceso de extracción se fundamenta en los resultados obtenidos por Lima, et. al., 2002.

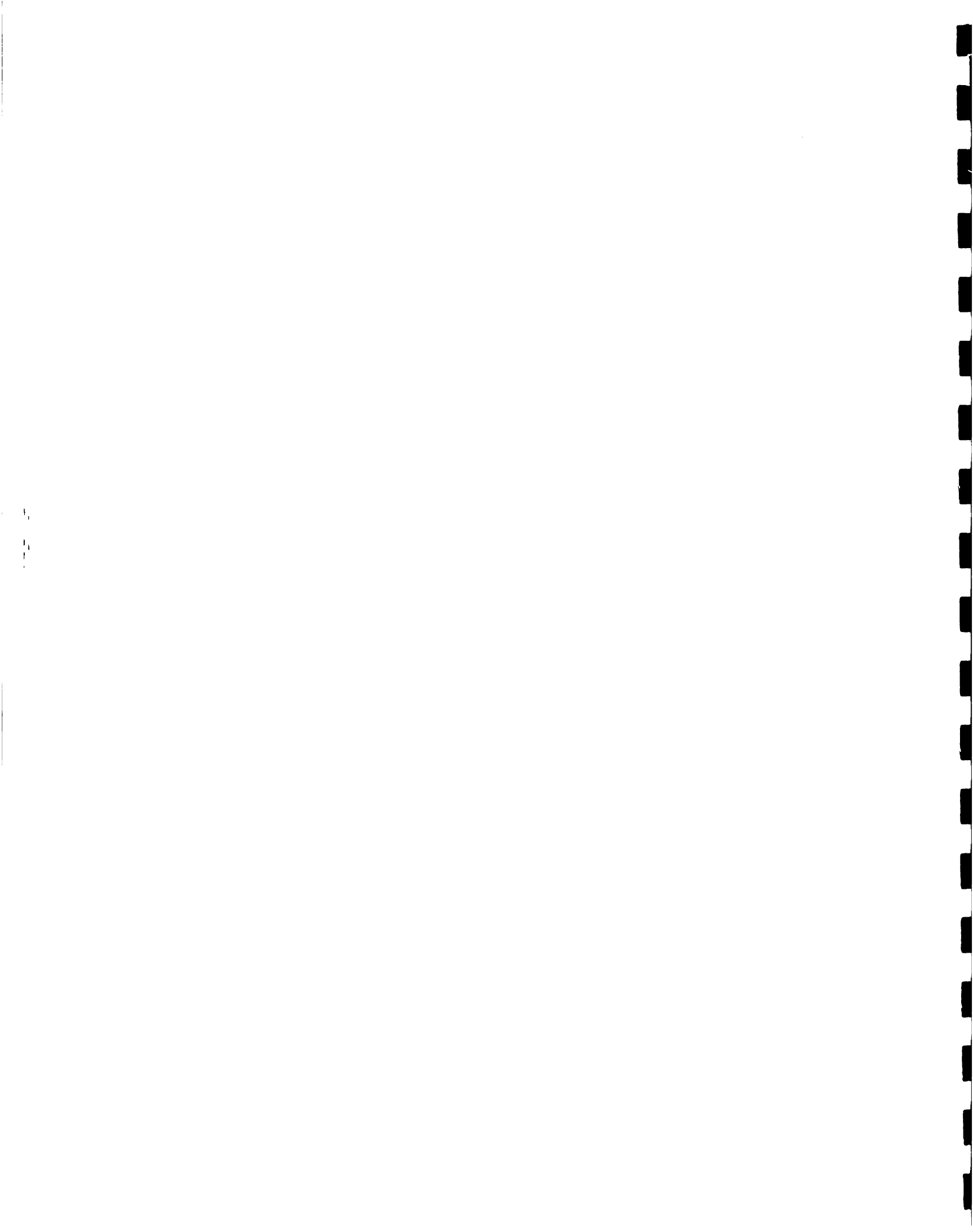
A continuación se presentan los elementos más importantes para efectuar las distintas etapas del proceso de extracción:

1. *Fermentación:* Se utilizan 50 g de hoja/l de agua. Fermentando por 18 horas.
2. *Oxigenación:* Se emplean bombas de pecera, oxigenándose por 15 minutos.
3. *Sedimentación y separación:* se lleva a cabo por gravedad y por centrifugación.
4. *Secado del polvo:* En estufa a 65°C, hasta peso constante.

#### **4.2 METODOS DE MEDICION DE LA VARIABLES INDICADORAS DE LOS PROCESOS DE SECADO Y DE EXTRACCION.**

Las variables indicadoras del avance del proceso de secado de la hoja, para ambas especies, serán el tiempo y el porcentaje de humedad de la hoja. Por otra parte, las variables que indicaran la calidad del colorante extraído serán el porcentaje en peso del polvo obtenido y el porcentaje de indigotina contenido en el polvo. A continuación se presenta la definición y/o el método de cuantificación de cada una de ellas:

- a. Tiempo de secado: se define como el intervalo de tiempo contado desde el momento en que se inicia el secado de la hoja hasta un instante determinado





de avance del mismo. Las divisiones del intervalo de tiempo así como la extensión del mismo se hará en función del comportamiento observado en preexperimentos hechos para las dos especies de planta, para cada tipo de secado y para cada nivel de temperatura experimentado.

- b. Porcentaje de humedad de la hoja: Se define, para un instante determinado de avance del proceso de secado, como la relación entre la diferencia del peso de sólido húmedo menos el peso del sólido seco respecto del peso del sólido seco. Para estas mediciones es necesario partir de un valor de humedad de referencia que es el contenido de humedad de la hoja fresca determinado por análisis de humedad parcial<sup>1</sup>.
- c. Porcentaje en peso del colorante obtenido: Este se determina a través de la relación entre el peso del polvo seco del colorante obtenido durante el proceso de extracción, y la masa de hoja seca utilizada (50 g), es decir:

$$\frac{\text{Peso de polvo seco}}{50 \text{ g de hoja seca}} \times 100$$

- d. Porcentaje de indigotina: La medición de esta variable se realiza mediante la aplicación del método modificado de Karl Grieder (Lima, et. al., 2002, ver anexo A). En él la cuantificación del porcentaje de indigotina en una muestra de colorante, viene dada por:

$$\% \text{Indigotina} = \frac{\text{ppm} \times \text{volumen} \times f.d. \times 100}{W_m \times 10^6}$$

---

<sup>1</sup> El análisis de humedad parcial se llevó a cabo para cada prueba en el laboratorio de Química Agrícola de la facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.

1  
2  
3

En donde: *ppm*, es la concentración de una solución de una muestra de polvo obtenida por el método espectrofotométrico de luz visible; *volumen*, es volumen de la solución de reserva; *f.d.*, factor de dilución, y;  $W_m$  peso de la muestra.

### **4.3 SECADO EN ESTUFA SIN CIRCULACION DE AIRE**

El secado de las hojas en estufa sin circulación de aire, se efectuó colocando inicialmente una muestra de cuatro libras de hoja sobre bandejas elaboradas de cedazo metálico de dimensiones 10x10x3 cm y posteriormente sometiéndola a calentamiento directo en una estufa PRECISION THELCO (T máxima de 200°C), tal como se presenta en la figura 4.1.



**FIGURA 4.1 ACONDICIONAMIENTO DE MUESTRAS PARA EL SECADO EN ESTUFA SIN CIRCULACION DE AIRE**

14  
14

La primera etapa del proceso de secado en estufa sin circulación de aire se ha realizado secando a tres niveles de temperatura constante, muestras por duplicado de 4 libras de hoja de ambas variedades y registrando la variación del porcentaje de humedad de las hojas con el tiempo (ver sección 4.2). Los tres niveles de temperatura empleados para el secado fueron 38, 45 y 60°C, la elección de estos niveles de temperatura obedece a los criterios presentados en la tabla 4.1.

**TABLA 4.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE NIVELES DE TEMPERATURA CONSTANTE PARA EL SECADO EN ESTUFA SIN CIRCULACIÓN DE AIRE.**

<i>Nivel de temperatura (°C)</i>	<i>Criterio de selección</i>
<b>38</b>	De acuerdo a recomendaciones bibliográficas para el secado de hierbas y especies <sup>2</sup> .
<b>45</b>	Valor de temperatura intermedio para identificar comportamientos.
<b>60</b>	Conocer el comportamiento de secado a temperaturas relativamente altas y no sugeridas para el calentamiento de hierbas.

Simultáneamente, para cada punto de tiempo se tomaron 50 gramos de muestra de hoja seca (seleccionados por el método de cuarteo) los que servían para ser procesados para la extracción del colorante (de acuerdo al método presentado en la sección 4.1), y de esta forma contar con las mediciones de las características de calidad del polvo obtenido (ver sección 4.2) que representaban el comportamiento para ese instante de tiempo.

En la tabla 4.2, se presentan los datos recolectados para el análisis del efecto del uso de hoja seca por calentamiento en estufa sin circulación de aire sobre las características de calidad del colorante obtenido.

<sup>2</sup> "Tecnología poscosecha y secado de hierbas y especies", Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica, 2000.

1  
2  
3

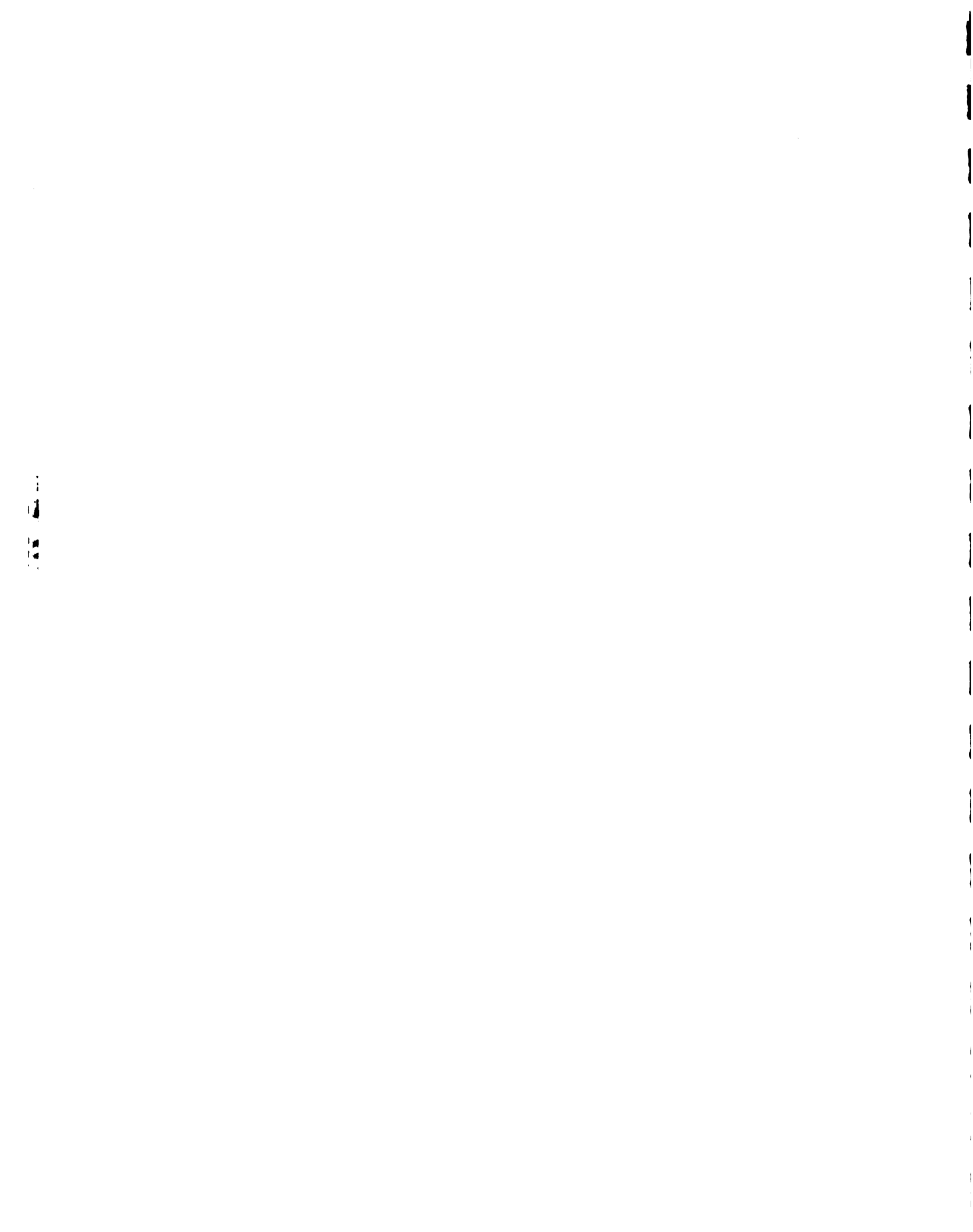
**TABLA 4.2 (a) RECOLECCION DE DATOS PARA EL SECADO EN ESTUFA SIN CIRCULACIÓN DE AIRE ESPECIE INDIGOFERA GUATEMALENSIS**

Progreso (min)	38°C			45°C			Progreso (min)	60°C		
	%humedad	%p/p de polvo	%Indigoitina	%humedad	%p/p de polvo	%Indigoitina		%humedad	%p/p de polvo	%Indigoitina
0	64.173	0.513	31.746	64.173	1.008	30.7695	0	64.173	0.956	43.087
10	61.00495	0.544	34.349	59.647	1.284	36.812	20	48.477	0.618	47.549
40	55.86987	0.519	31.048	50.9815	0.988	31.0485	40	34.992	0.656	37.509
90	48.89993	0.619	26.168	45.4615	0.752	34.023	60	27.989	0.736	46.341
150	45.47963	0.548	37.230	30.079	0.65	37.602	80	14.575	0.516	24.494
230	36.45281	0.551	39.555	20.031	0.596	30.5835	100	13.985	0.488	27.376
300	25.97581	0.539	40.763	7.8005	0.578	28.91	120	4.979	0.61	32.396

**TABLA 4.2 (b) RECOLECCION DE DATOS PARA EL SECADO EN ESTUFA SIN CIRCULACIÓN DE AIRE ESPECIE INDIGOFERA SUFRUCTIOSA**

Progreso (min)	38°C			45°C			Progreso (min)	60°C		
	%humedad	%p/p de polvo	%Indigoitina	%humedad	%p/p de polvo	%Indigoitina		%humedad	%p/p de polvo	%Indigoitina
0	67.67	0.785	20.915	67.670	0.694	33.0935	0	67.45	0.738	7.76
10	64.376	0.847	28.5845	64.156	0.711	23.332	20	47.186	0.386	19.8446
40	59.6695	0.69	29.607	57.744	0.671	37.0445	40	44.429	0.514	0
90	55.933	0.682	26.2605	49.171	0.582	25.192	60	29.244	0.398(°)	0
150	52.093	0.924	17.9405	34.907	0.574	15.663	80	19.338	0.25(°)	0
230	43.9635	0.752	21.1945	27.047	0.52	6.924	100	15.77	0.252(°)	0
300	32.3395	0.63	13.385	12.550	0.263	0	120	6.007	0.32(°)	0

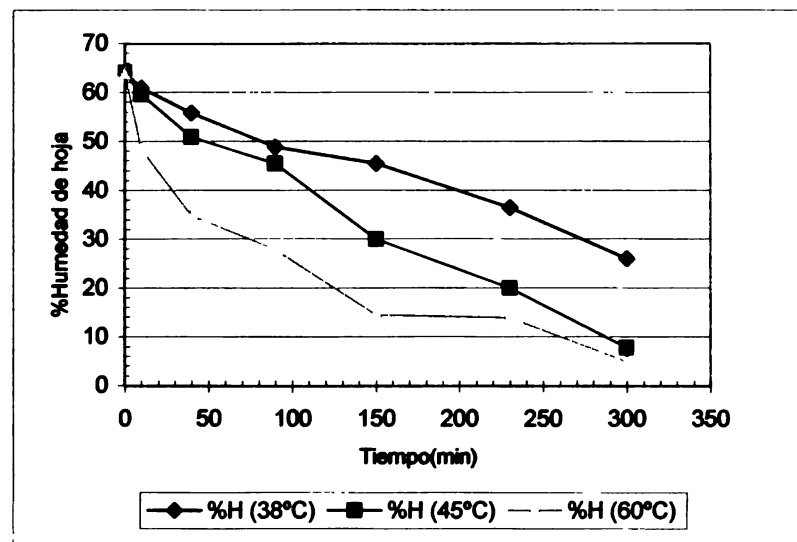
(°) El polvo obtenido presenta coloración verde.



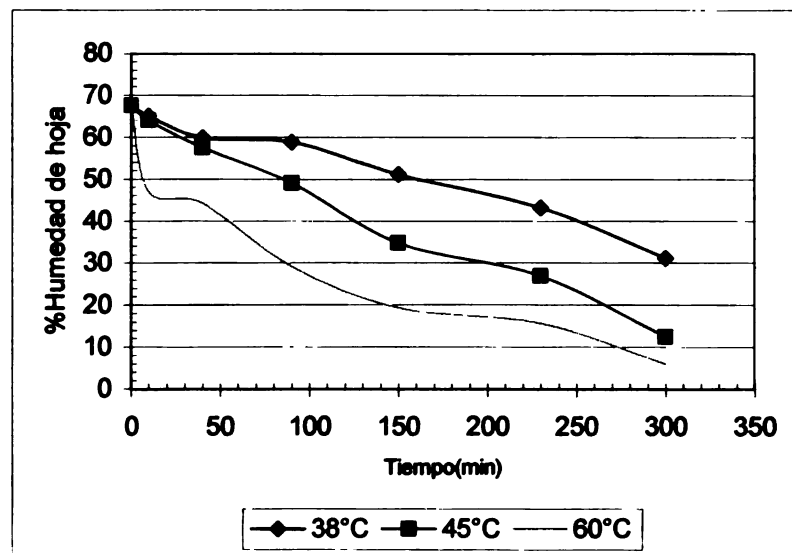


### 4.3.1 ANALISIS DE DATOS PARA EL SECADO EN ESTUFA SIN CIRCULACION DE AIRE

En el gráfico 4.1 a y b, se presentan las curvas de secado obtenidas para las tres temperaturas experimentadas, para ambas variedades de plantas.



(a)

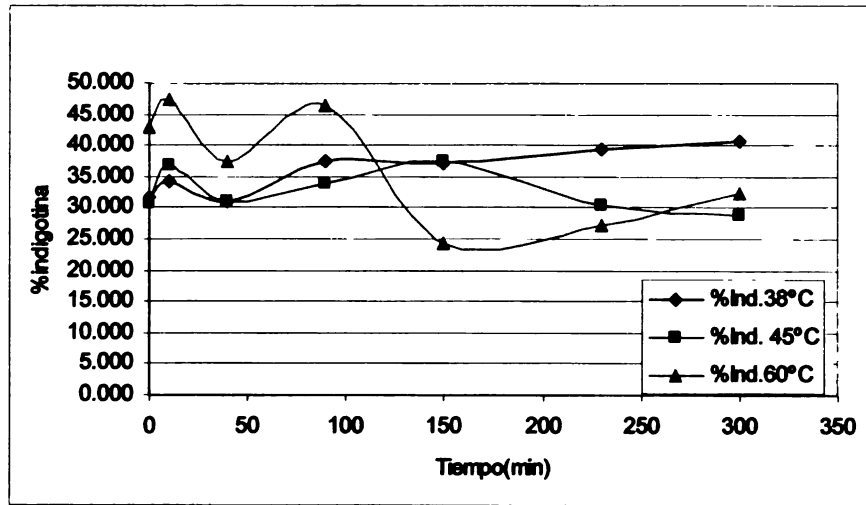


(b)

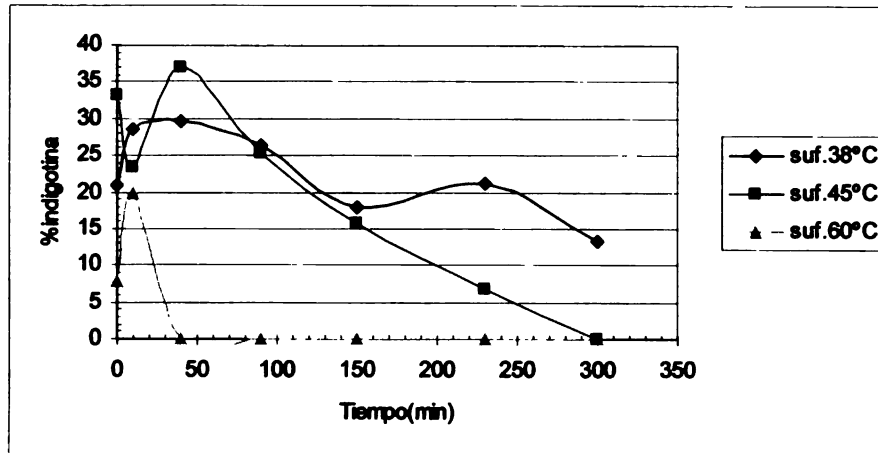
**GRAFICO 4.1 CURVA PARA EL PROCESO DE SECADO SIN CIRCULACION DE AIRE:(a) ESPECIE GUATEMALENSIS; (b) ESPECIE SUFRUCTICOSA**

1  
2

En el gráfico 4.2, se presenta el comportamiento de la variación del porcentaje de indigotina con respecto a la variación del tiempo para las temperaturas de 38, 45 y 60°C, tanto para la especie guatemalensis (figura 5.2, a), como para la especie sufruticosa (figura 5.2,b).



(a)

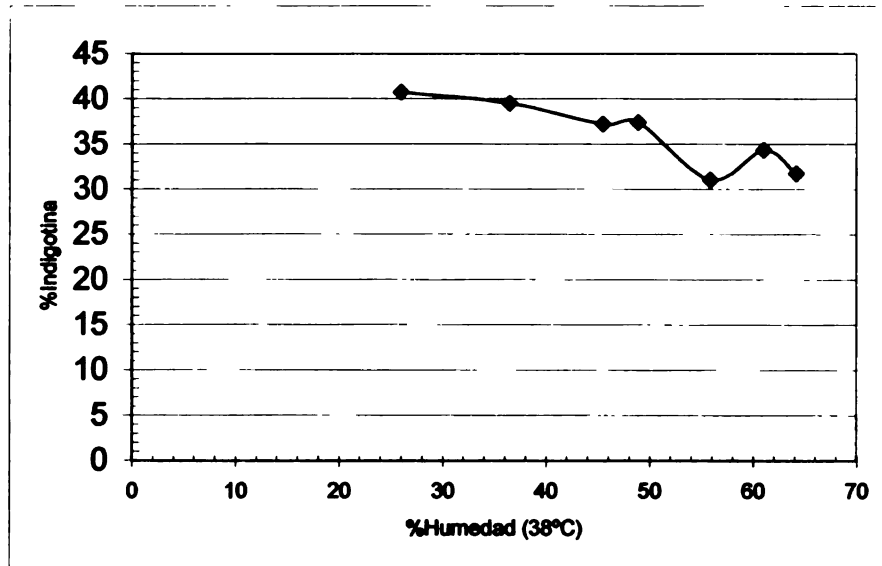


(b)

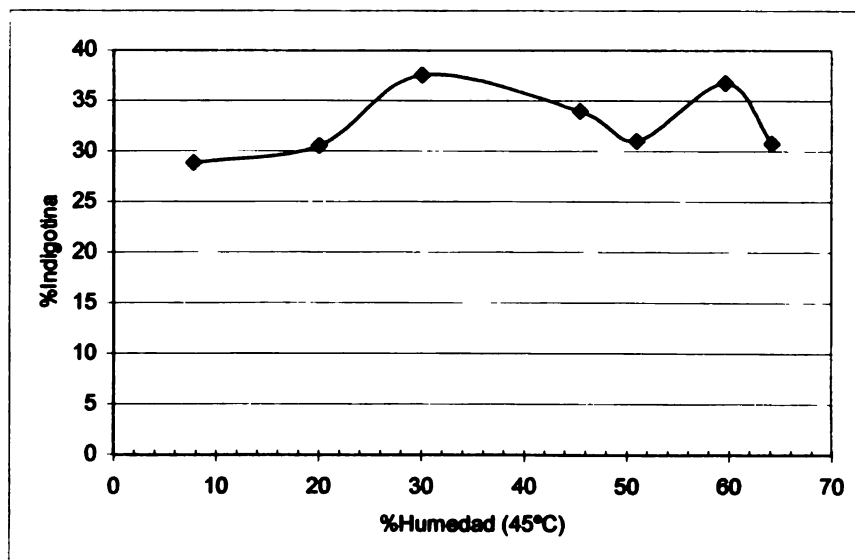
**GRAFICO 4.2 CURVA DE COMPORTAMIENTO DEL % DE INDIGOTINA CON RESPECTO AL TIEMPO DE SECADO EN MINUTOS:(a) ESPECIE GUATEMALENSIS; (b) ESPECIE SUFRUTICOSA**



En el gráfico 4.3, se presenta el comportamiento de la variación del porcentaje de indigotina con respecto al porcentaje de humedad contenido en la hoja, para las temperaturas de 38, 45 y 60°C y para la especie guatemalensis.

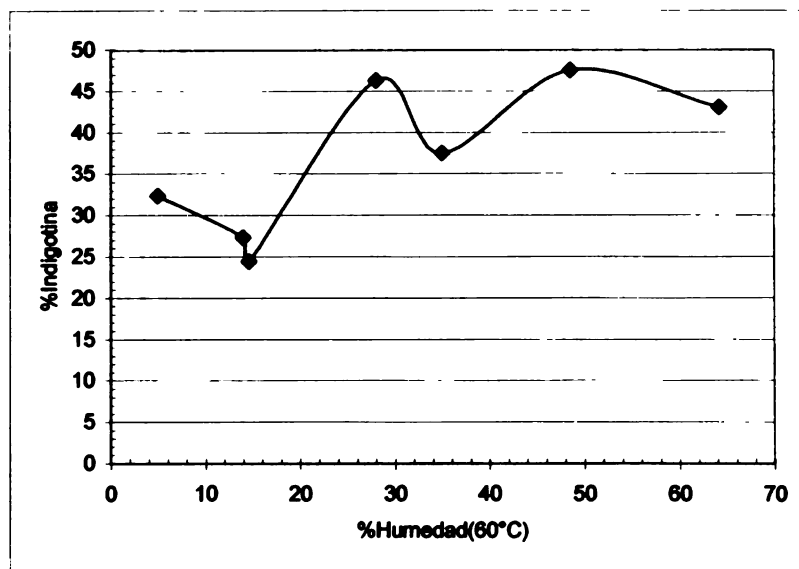


(a)



(b)

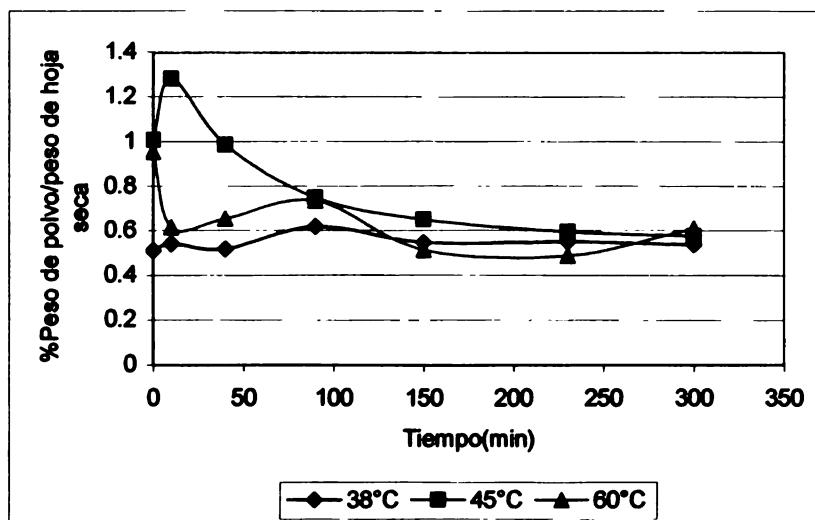




(c)

**GRAFICO 4.3 CURVA DE COMPORTAMIENTO DEL % DE INDIGOTINA CON RESPECTO AL % DE HUMEDAD DE LA HOJA, ESPECIE GUATEMALENSIS**

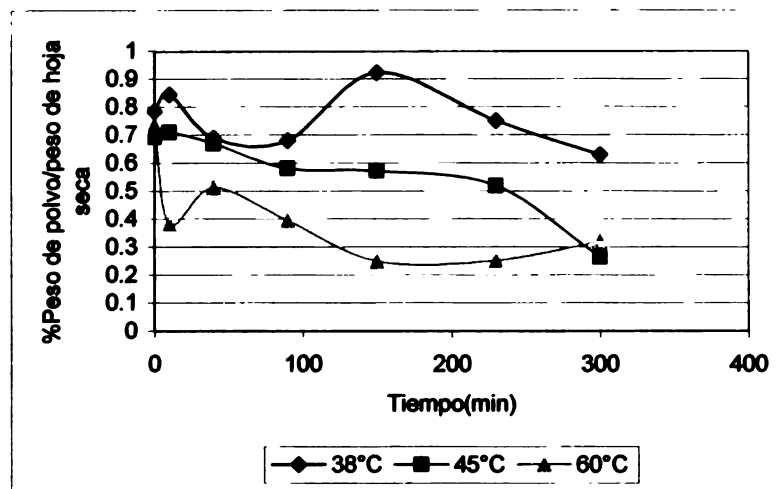
En el gráfico 4.4, se presenta el comportamiento del porcentaje en peso del polvo de colorante obtenido con respecto al tiempo y % de humedad de la hoja a los tres niveles de temperatura de secado y para las especies Guatemalensis y Sufruticosa.



(a)

1  
2  
3

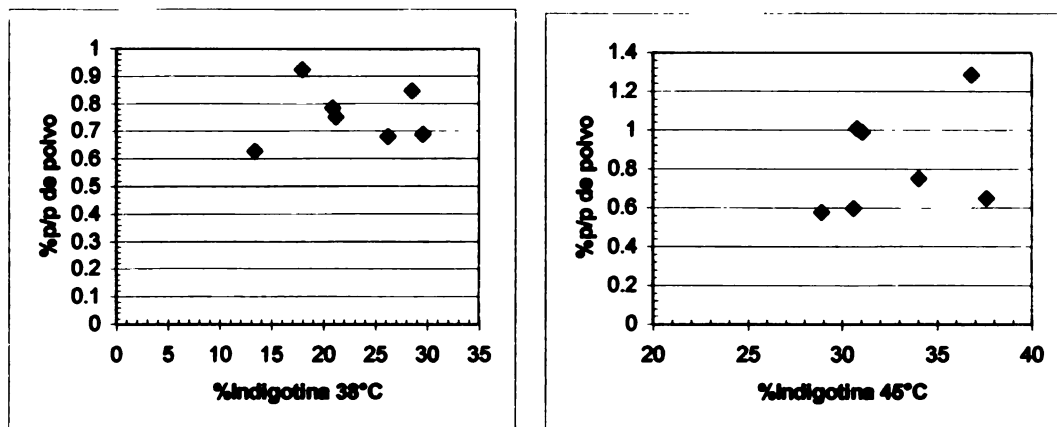




(b)

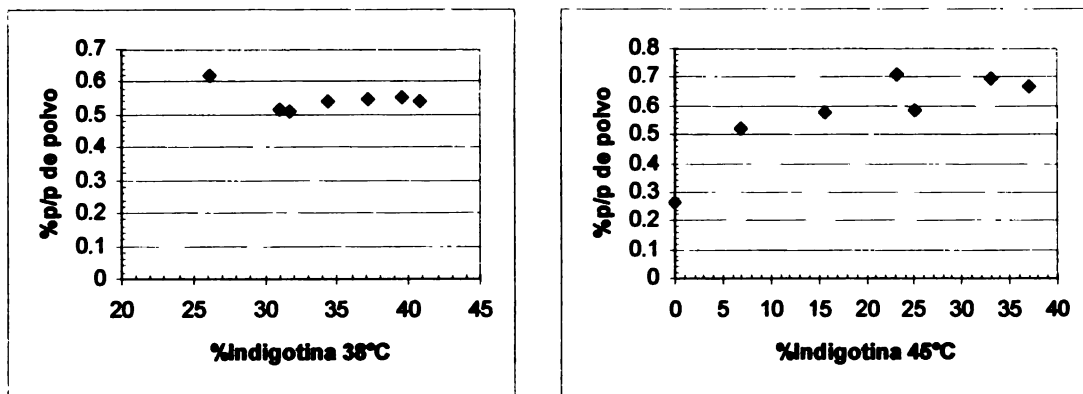
**GRAFICO 4.4 COMPORTAMIENTO DEL %PESO DEL POLVO OBTENIDO USANDO HOJA SECA POR EL METODO DE CALENTAMIENTO EN ESTUFA SIN CIRCULACION DE AIRE:(a) Especie Guatemalensis; (b) Especie Sufructicosa**

En el gráfico 4.5, se presentan como ejemplos, los diagramas de dispersión entre los valores del porcentaje de indigotina y el porcentaje en peso del colorante obtenidos, para las dos especies de planta a las temperaturas de 38 y 45°C.



(a)





(b)

**GRAFICO 4.5 DIAGRAMAS DE CORRELACION ENTRE EL % DE INDIGOTINA Y %p/p DE POLVO: (a) I. SUFRUCTICOSA; (b) I. GUATEMALENSIS**

Como puede observarse del gráfico 4.1, el comportamiento de secado de la hoja usando el proceso de secado en estufa sin circulación de aire, varía con respecto a la temperatura y la especie. Obviamente, el decaimiento del porcentaje de humedad de la hoja con la temperatura es más pronunciado y más inestable a temperaturas altas que a temperaturas bajas para ambas especies. Por otra parte, puede observarse que el modelo que explica ese decaimiento varía entre las dos especies.

En cuanto al comportamiento del porcentaje de indigotina con respecto al tiempo de secado (grafico 4.2, a y b), puede observarse que para la especie *guatemalensis*, el porcentaje de indigotina es poco variable con el tiempo a las temperaturas de 38 y 45°C, lo que indica que a estas temperaturas la calidad de la hoja es bastante estable, no existiendo correlación significativa al 5% entre dichas variables a estas temperaturas. Sin embargo, a la temperatura de 60°C para la misma especie existe un decaimiento más significativo del porcentaje de indigotina con respecto al tiempo de secado, mostrando por tanto, una mayor inestabilidad de la calidad del producto obtenido. Por otra parte, para la especie *sufruticosa* se observa una gran variabilidad del porcentaje de indigotina

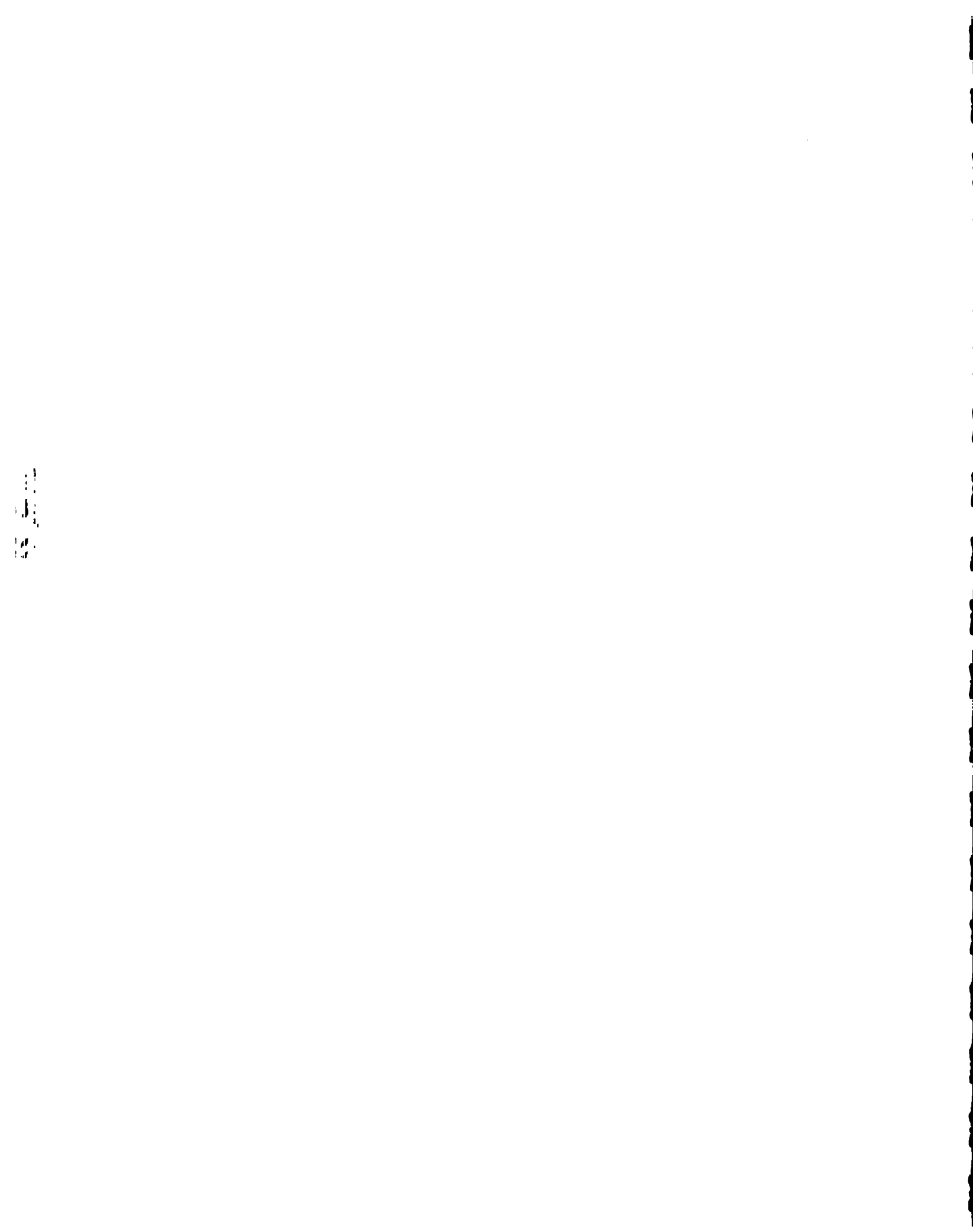
11  
12  
13  
14

obtenido con el tiempo para las tres temperaturas experimentadas, esto puede indicar que el proceso de secado en estufa de la hoja de esta especie es más inestable y más difícil de controlar que para el caso de la hoja de la especie *guatemalensis*.

El gráfico 4.3, que representa el comportamiento del contenido en % de indigotina con respecto al porcentaje de humedad de la hoja, indica también al igual que el gráfico 4.2a, que el proceso de secado de la hoja de la especie *guatemalensis* a las temperaturas de 38 y 45°C, permite una calidad del colorante (en % de indigotina) bastante estable. Mientras que a la temperatura de 60°C, a parte de observarse una mayor variabilidad en el porcentaje de indigotina, este disminuye de manera más notable a medida que disminuye el porcentaje de humedad de la hoja. En conclusión, puede decirse que para la especie *guatemalensis*, a medida que transcurre el tiempo y la temperatura de secado aumenta a 60°C, la variación en el porcentaje de indigotina se vuelve más inestable, disminuyendo además, el contenido de indigotina en el colorante extraído. Para la especie *sufructicosa*, se observa que a la temperatura de 60°C, el polvo obtenido presenta una coloración verde y el porcentaje de indigotina en el mismo es cero.

En cuanto al comportamiento del porcentaje en peso del colorante obtenido con respecto a la temperatura de secado y el tiempo, puede decirse que para la especie *guatemalensis* (gráfico 4.4, a) el porcentaje en peso de colorante es estable (varía poco) después de un tiempo de 100 minutos de secado a las temperaturas de 38, 45 y 60°C, manteniéndose para las tres temperaturas y para la continuación en el tiempo en un intervalo de  $0.599 \pm 0.052$  %p/p ( $1-\alpha = 0.95$ ).

Sin embargo, puede observarse que el porcentaje en peso del colorante obtenido para la especie *sufructicosa* (gráfico 4.4, b) varía significativamente para las tres temperaturas de secado experimentadas, disminuyendo con el aumento del tiempo de secado y con el aumento de la temperatura.



No existe correlación significativa al 5% entre las características de calidad del colorante extraído para ninguna de las especies de planta ni para ninguna de las temperaturas experimentadas (ver gráfico 4.5).

### **4.3 SECADO SOLAR**

El secado solar de las hojas de la planta de añil se efectuó primeramente, colocando muestras de cuatro libras de hoja fresca sobre bandejas construidas de cedazo metálico de dimensiones 10x10x3 cm. Posteriormente las bandejas con hojas fueron acondicionadas en un área en donde el sol no incide directamente (ver figura 4.2). Lo anterior obedece a las sugerencias encontradas en la bibliografía para el secado natural de hierbas y vegetales de hoja.



**FIGURA 4.2 ACONDICIONAMIENTO DE MUESTRAS PARA EL SECADO SOLAR**

11  
12  
13  
14  
15



El avance del proceso de secado solar se siguió registrando la variación del porcentaje de humedad de las hojas con el tiempo, el cual progresó en los niveles de 0, 20, 40, 80, 120, 200 y 300 minutos.

El porcentaje de humedad de la hoja a tiempo cero (humedad de referencia) fue la humedad de la hoja fresca la cual se determinó mediante análisis de humedad parcial (ver sección 4.3).

Se efectuaron dos repeticiones del proceso de secado solar para cada una de las especies de planta consideradas (*I. Guatemalensis* e *I. Sufruticosa*). Haciéndose además, registros de la temperatura y humedad relativa ambientales que para este caso son considerados factores no controlables.

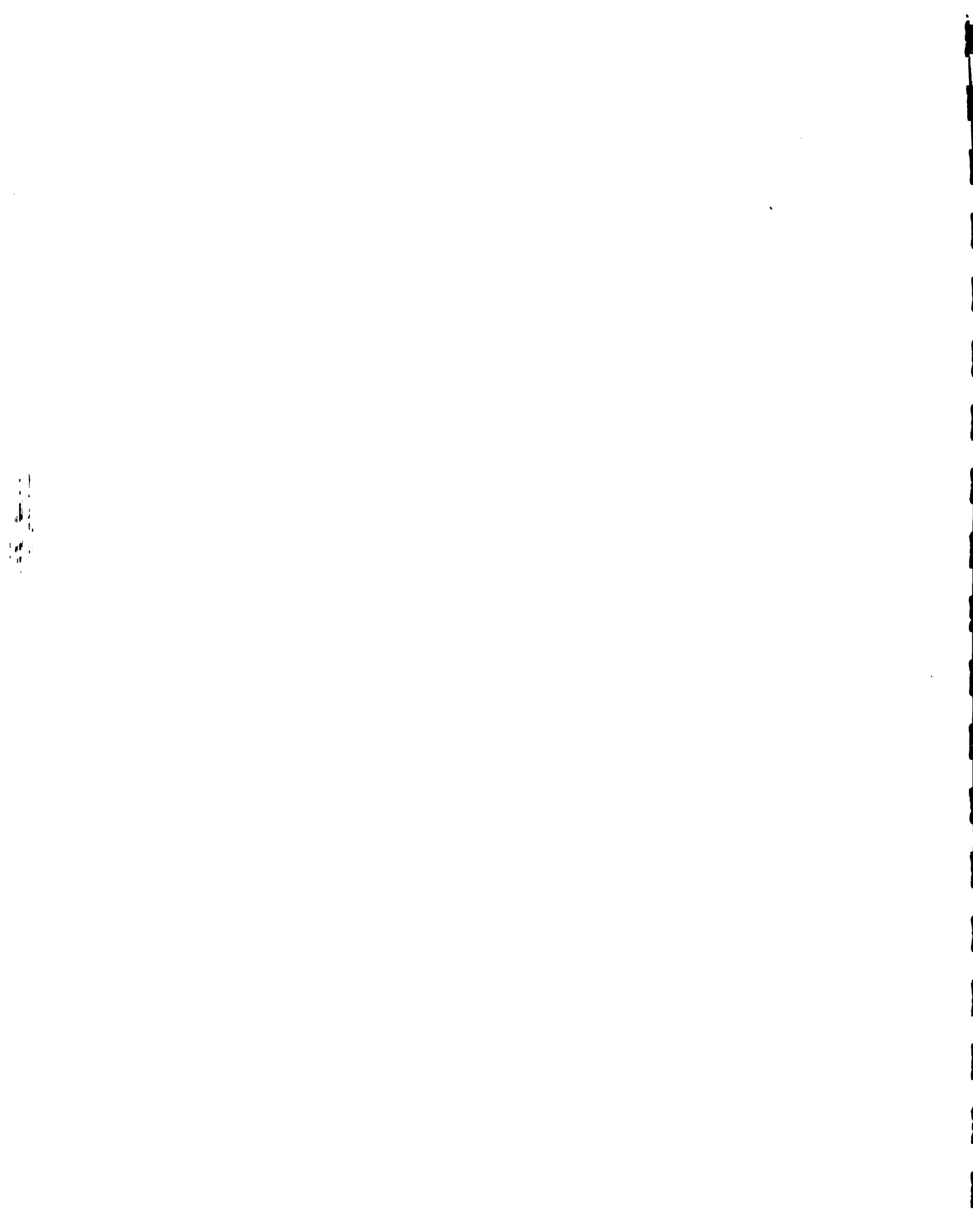
En la tabla 4.3, se presentan los datos recolectados para el secado solar.

**TABLA 4.3 (a) RECOLECCION DE DATOS PARA EL SECADO SOLAR ESPECIE INDIGOFERA GUATEMALENSIS**

<b>Progreso (min)</b>	<b>%humedad</b>	<b>%p/p de polvo</b>	<b>%Indigotina</b>
0	64.173	0.781	38.299
20	55.3975	0.941	40.9025
40	49.017	0.841	45.504
80	38.5135	0.924	29.979
120	27.4765	0.748	11.0145
200	14.384	0.551	27.283
300	8.16	0.52	14.1285

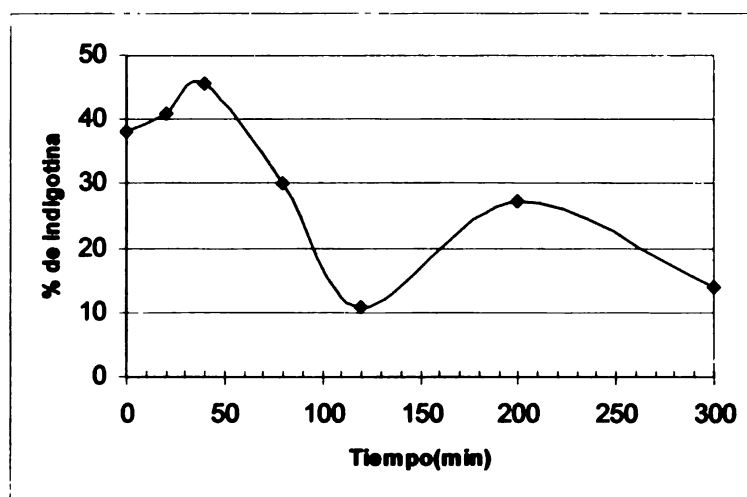
**TABLA 4.3 (b) RECOLECCION DE DATOS PARA EL SECADO SOLAR ESPECIE INDIGOFERA SUFRUCTICOSA**

<b>Progreso (min)</b>	<b>%humedad</b>	<b>%p/p de polvo</b>	<b>%Indigotina</b>
0	67.67	0.436	30.165
20	60.731	0.563	34.2555
40	55.643	0.585	26.9115
80	42.4175	0.58	21.7985
120	37.479	0.355	7.296
200	21.6485	0.476	2.7185
300	13.5365	0.415	0

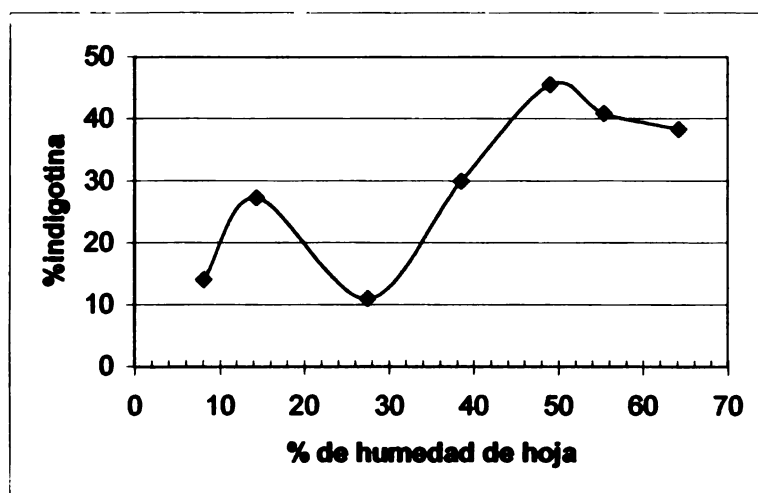


#### 4.4.1 ANALISIS DE DATOS PARA EL SECADO SOLAR

En el gráfico 4.6 se presenta el comportamiento del porcentaje de indigotina con el grado de avance del proceso de secado de la hoja para la especie *I. guatemalensis*, este grado de avance es indicado por el tiempo de secado (gráfico 4.6, a) y por el porcentaje de humedad de la hoja que es procesada para la extracción del colorante (gráfico 4.6, b).

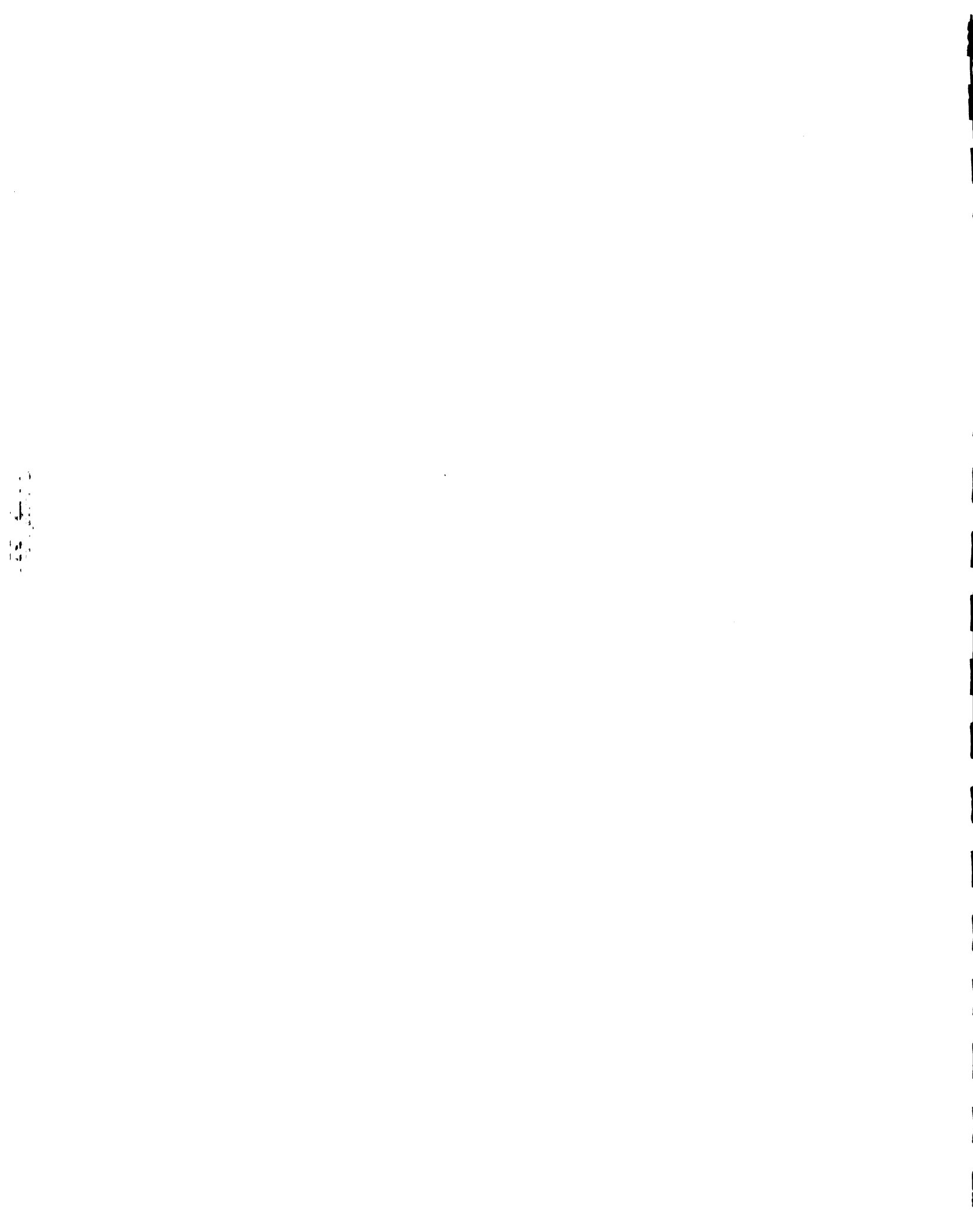


(a)

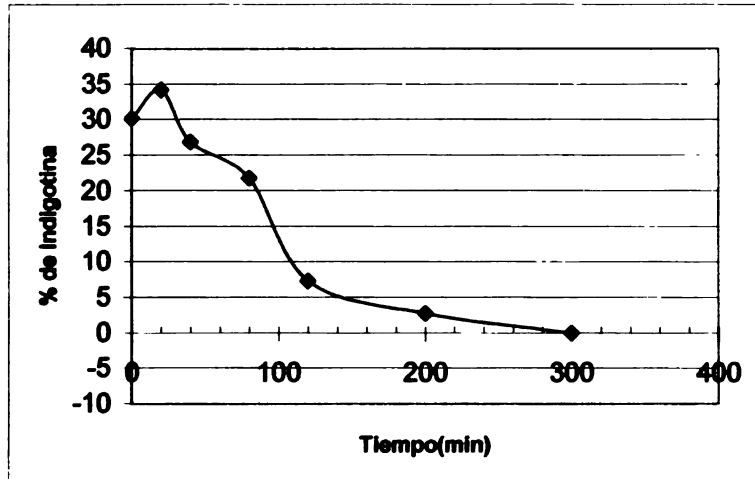


(b)

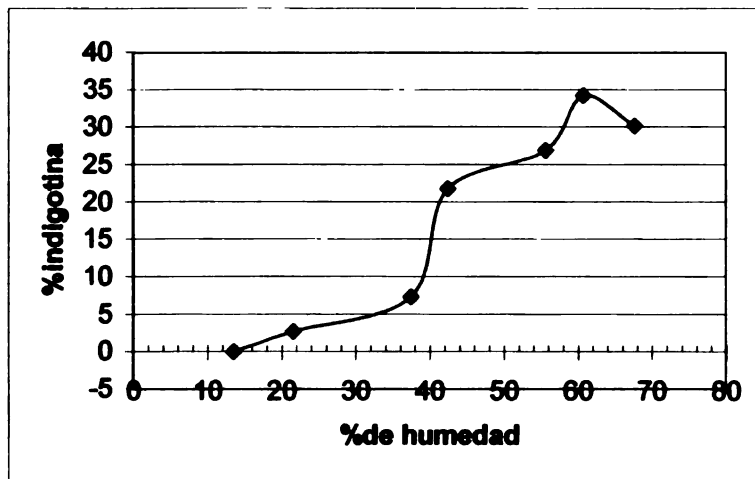
**GRAFICO 4.6 COMORTEAMIENTO DEL PORCENTAJE DE INDIGOTINA CON EL GRADO DE AVANCE DEL PROCESO DE SECADO DE LA HOJA DE LA ESPECIE *I. GUATEMALENSIS*: (a) GRADO DE AVANCE INDICADO POR EL TIEMPO; (b) GRADO DE AVANCE INDICADO CON EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA HOJA**



En el gráfico 4.7, que es un gráfico equivalente al gráfico 4.6, se presenta, el comportamiento del porcentaje de indigotina con el grado de avance del proceso de secado de la hoja para la especie *I. sufruticosa*, indicado por el tiempo de secado (gráfico 4.7, a) y por el porcentaje de humedad de la hoja que es procesada para la extracción del colorante (gráfico 4.7, b).



(a)

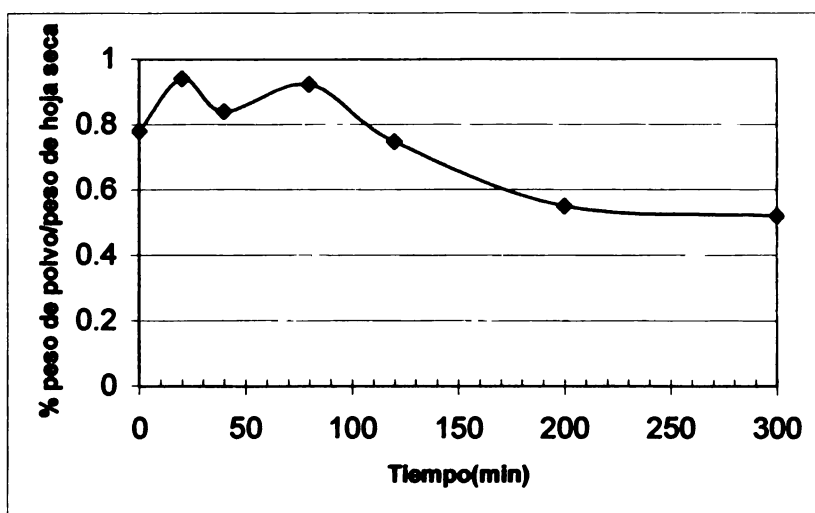


(b)

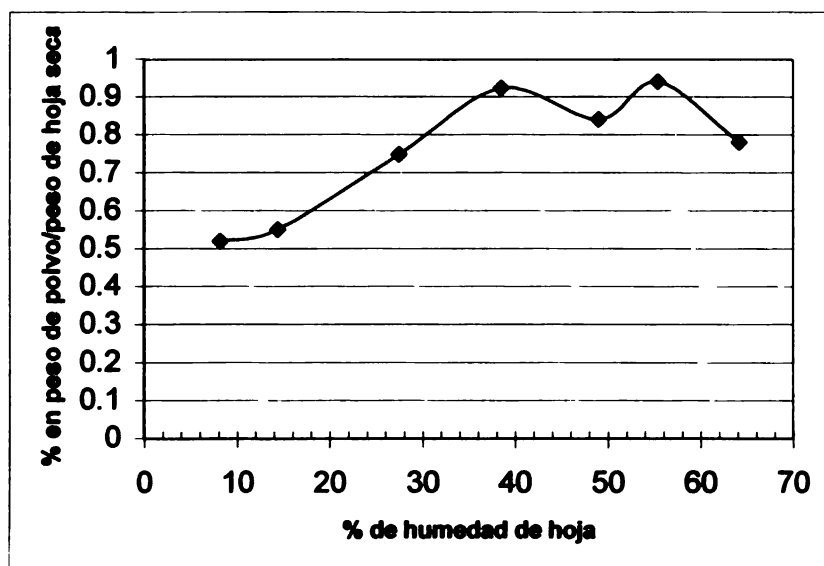
**GRAFICO 4.7 COMORTEAMIENTO DEL PORCENTAJE DE INDIGOTINA CON EL GRADO DE AVANCE DEL PROCESO DE SECADO DE LA HOJA DE LA ESPECIE *I. SUFRUCTICOSA*: (a) GRADO DE AVANCE INDICADO POR EL TIEMPO; (b) GRADO DE AVANCE INDICADO CON EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA HOJA**



En el gráfico 4.8, se presenta el comportamiento del porcentaje en peso del colorante obtenido con el grado de avance del proceso de secado de la hoja para la especie *I. guatemalensis*, este grado de avance es indicado por el tiempo de secado (gráfico 4.8, a) y por el porcentaje de humedad de la hoja que es procesada para la extracción del colorante (gráfico 4.8, b).

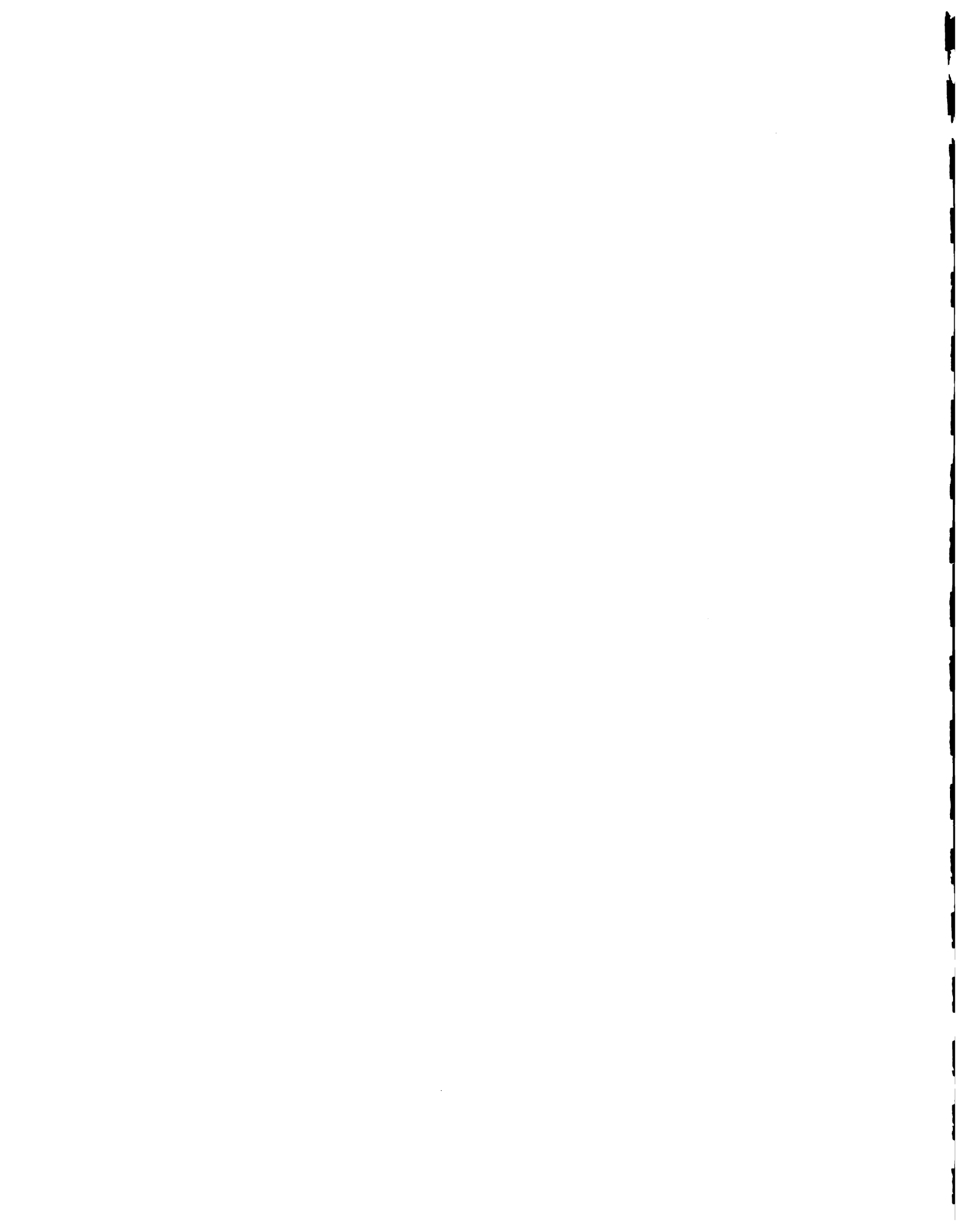


(a)



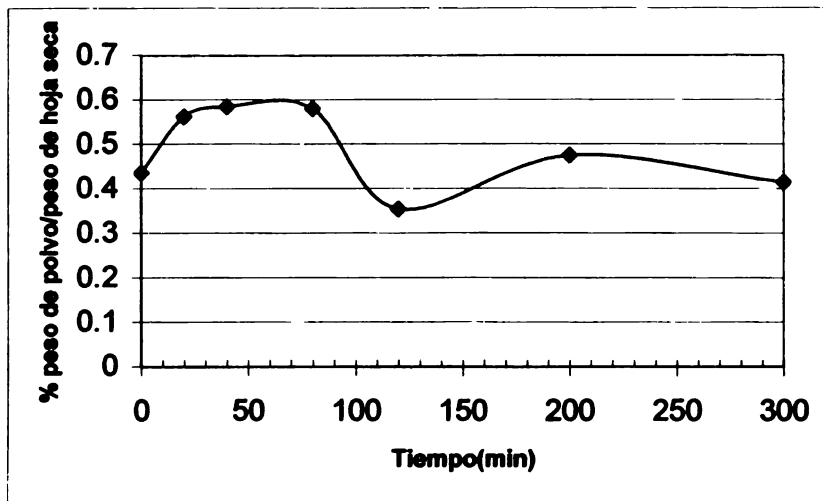
(b)

**GRAFICO 4.8 COMORTEAMIENTO DEL PORCENTAJE EN PESO DE COLORANTE OBTENIDO CON EL GRADO DE AVANCE DEL PROCESO DE SECADO DE LA HOJA DE LA ESPECIE I. GUATEMALENSIS: (a) GRADO DE AVANCE INDICADO POR EL TIEMPO; (b) GRADO DE AVANCE INDICADO CON EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA HOJA**

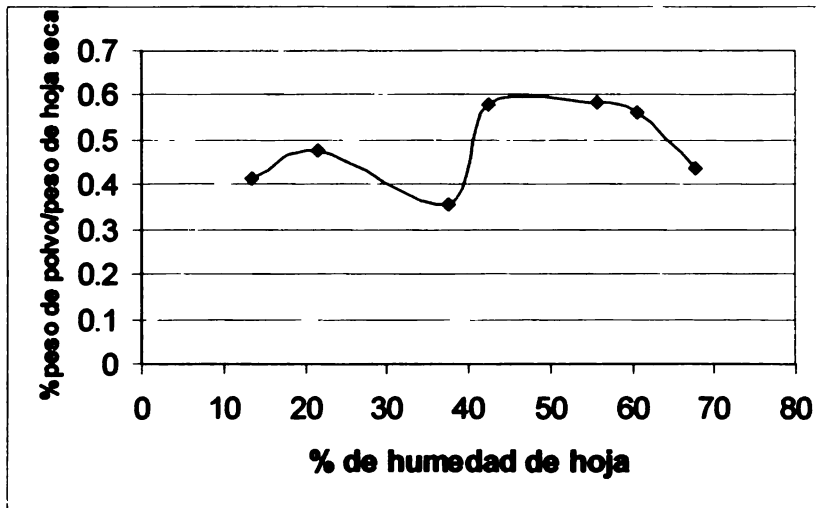




El gráfico 4.9, que es un gráfico equivalente al gráfico 4.8, representa, el comportamiento del porcentaje en peso del colorante obtenido con el grado de avance del proceso de secado de la hoja para la especie *I. sufruticosa*, indicado por el tiempo de secado (gráfico 4.9, a) y por el porcentaje de humedad de la hoja que es procesada para la extracción del colorante (gráfico 4.9, b).

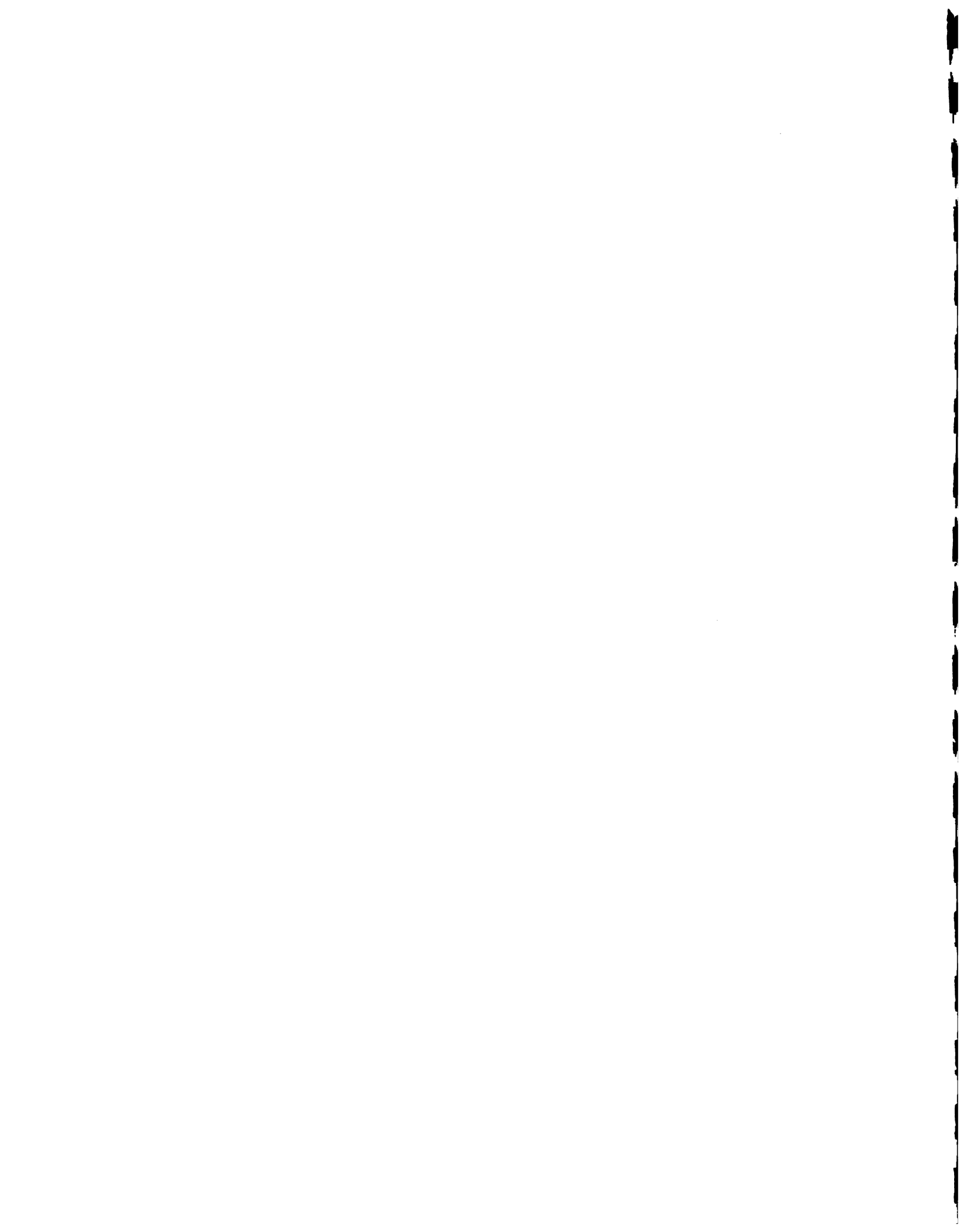


(a)

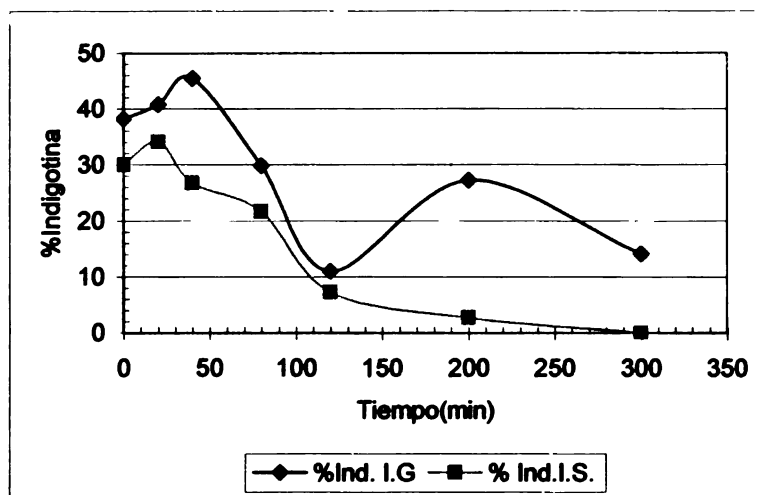


(b)

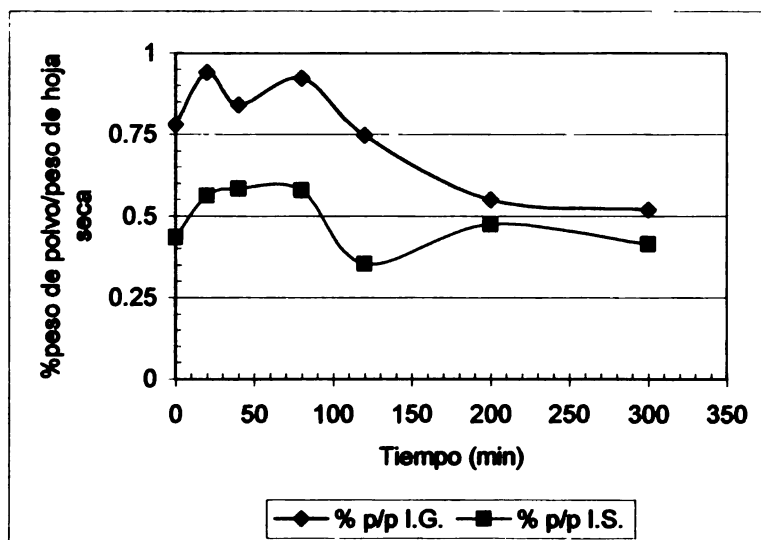
**GRAFICO 4.9 COMORTEAMIENTO DEL PORCENTAJE EN PESO DE COLORANTE OBTENIDO CON EL GRADO DE AVANCE DEL PROCESO DE SECADO DE LA HOJA DE LA ESPECIE *I. SUFRUCTICOSA*: (a) GRADO DE AVANCE INDICADO POR EL TIEMPO; (b) GRADO DE AVANCE INDICADO CON EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA HOJA**



En la gráfica 4.10 a y b, se presenta una comparación del comportamiento de las características de calidad del colorante obtenido con el tiempo de secado entre las especies de planta *I. guatemalensis* e *I. sufruticosa*



(a)

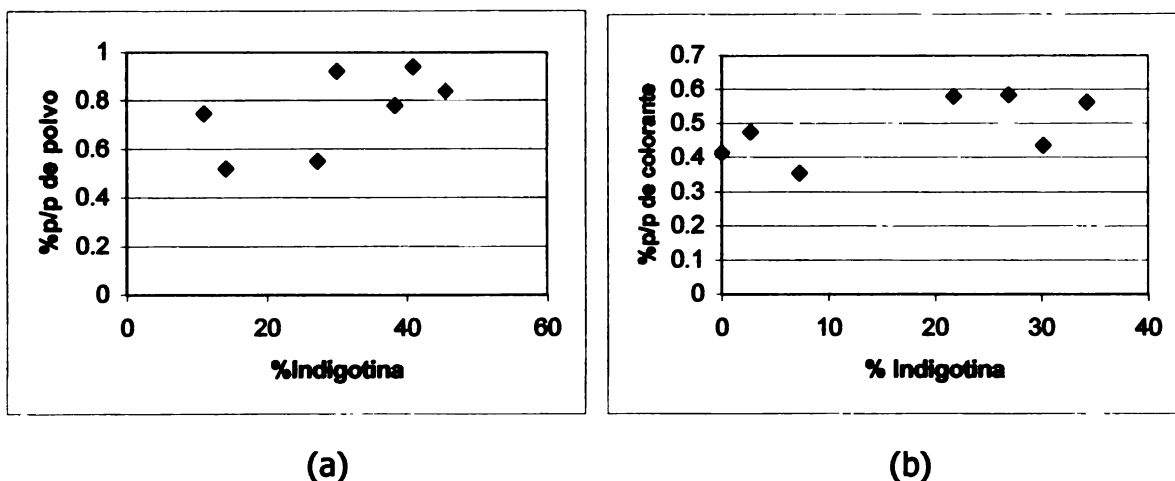


(b)

**GRAFICO 4.10 COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS DE CALIDAD DEL COLORANTE CON EL TIEMPO DE SECADO DE LA HOJA PARA LAS ESPECIES I.GUATEMALENSIS E I. SUFRUCTICOSA: (a) % INDIGOTINA; (b) %P/P DE COLORANTE**



En la gráfica 4.11 a y b, se presentan los diagramas de dispersión entre las características de calidad del colorante extraído para ambas especies de planta.



**GRAFICO 4.11 DIAGRAMA DE CORRELACION ENTRE LAS CARACTERISTICAS DE CALIDAD DEL COLORANTE (a) I. GUATEMALENSIS; (b) I. SUFRUCTICOSA**

En general, existe una correlación significativa al 5% entre el porcentaje de indigotina y el grado de avance del proceso de secado solar.

Para ambas especies de planta, se observan comportamientos similares del porcentaje de indigotina a medida que el tiempo de secado de la hoja aumenta o bien disminuye el porcentaje de humedad de la misma, presentándose, para ambos casos, un máximo de contenido de indigotina para un determinado grado de avance del secado solar seguido de un decrecimiento en el porcentaje de indigotina del colorante a medida que nivel de secado aumenta (ver figuras 4.6 y 4.7). Para la especie *Indigófera guatemalensis*, el máximo porcentaje de indigotina obtenido (45.55%) se dio cuando el tiempo de secado ha avanzado aproximadamente 40 minutos, después de este tiempo el porcentaje de indigotina tiende a disminuir con el tiempo. Por otra parte, para la especie *Indigófera sufruticosa*, el máximo porcentaje de indigotina obtenido (34.26%) se dio cuando el tiempo de secado ha avanzado aproximadamente 20 minutos.



A partir del gráfico 4.10 a, se observa que los contenidos de indigotina del colorante extraído usando hojas de la especie guatemalensis siempre son mayores que los obtenidos para la especie sufruticosa.

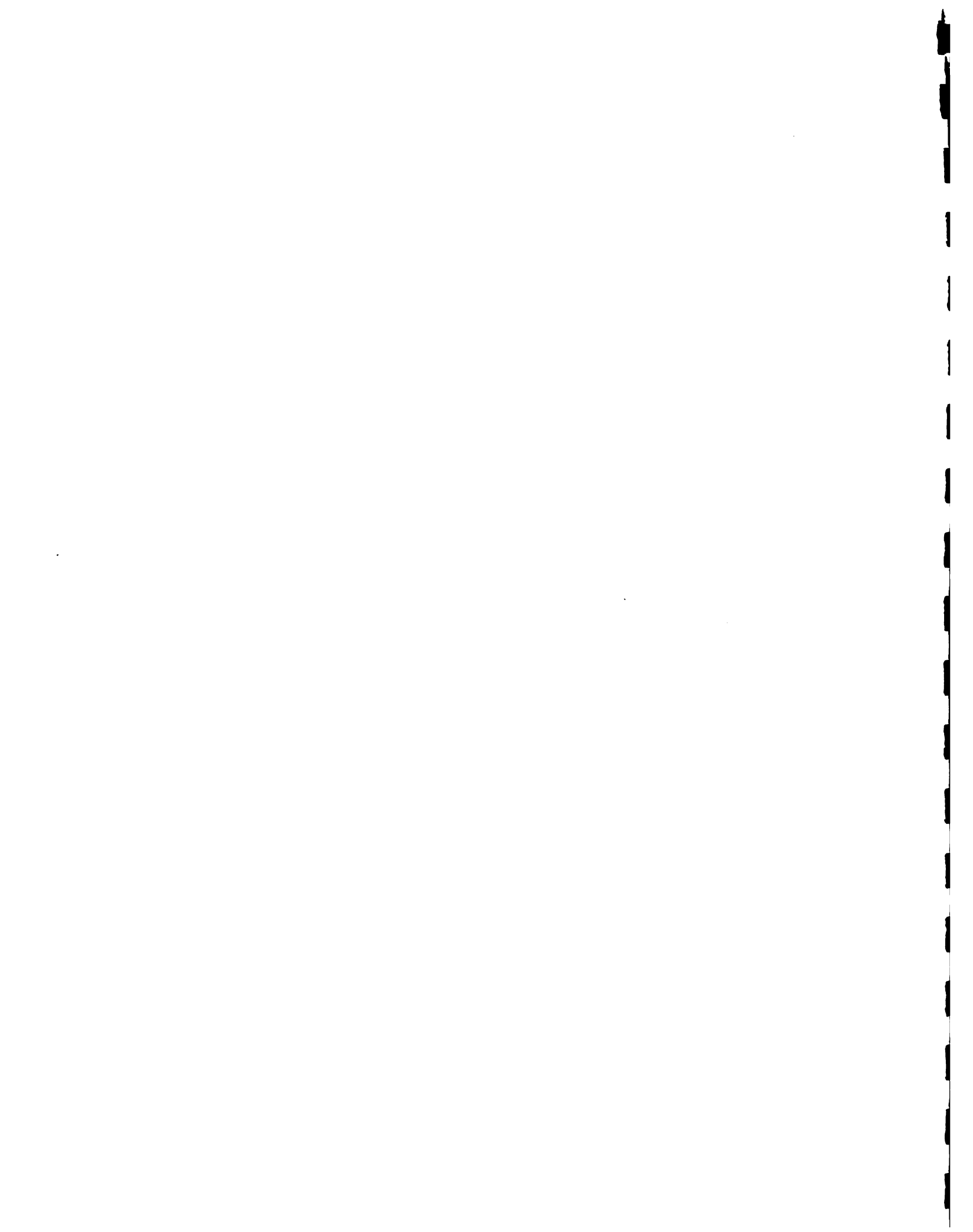
Se ha determinado que existe una correlación significativa al 5% entre el porcentaje en peso del colorante con respecto al avance del secado solar de la hoja. Según el gráfico 4.10 b, existe después de aproximadamente 100 minutos de secado, para ambas especies de planta, una disminución del porcentaje en peso con respecto al avance del secado solar, ya que, como puede observarse, antes de los 100 minutos existe un comportamiento estable y máximo en este porcentaje. La disminución en esta característica es más pronunciada para la especie guatemalensis que para la especie sufruticosa, no obstante, la cantidad relativa del polvo de colorante recuperado es siempre mayor para la especie guatemalensis que para la especie sufruticosa.

Finalmente, no existe correlación significativa al 5% entre las características de calidad del colorante extraído (porcentaje de indigotina y porcentaje en peso del polvo del colorante) para ninguna de las especies de planta (ver gráfico 4.11).

#### **4.5 SECADO CON CIRCULACION DE AIRE**

El secado de la hoja con circulación de aire se llevó a cabo en un secador de bandejas discontinuo a escala de laboratorio.

Similarmente, a los procesos de secado de las secciones 4.3 y 4.4, el registro de este proceso se llevó a cabo mediante el seguimiento de la variación con respecto al tiempo del peso de muestras de 4 libras de hoja, como indicador del porcentaje de humedad de la hoja. Las muestras de hoja se colocaron en bandejas de dimensiones de 10x10x2 cm en el interior del secador, haciéndose pasar luego un flujo de aire caliente a temperatura constante. En la figura 4.3, se muestra la colocación de las muestras en el secador empleado.





En general, se hicieron dos pruebas del proceso a temperaturas cercanas a los 35 y 50°C, para cada una de las especies de planta. Se trabajó en un rango de tiempo de 0 a 60 minutos con intervalos de 10 minutos.



**FIGURA 4.3 COLOCACION DE MUESTRAS EN EL SECADOR DE BANDEJAS CON CIRCULACIÓN DE AIRE**

Los parámetros del proceso fueron:

(a) *El tiempo de secado* que se controló, como ya se mencionó anteriormente, con intervalos de 10 minutos, partiendo de un tiempo inicial de 0 y llegando a un tiempo final de 60 minutos. (b) *La temperatura del aire caliente* que se hizo circular en el secador y que trató de regularse a los niveles de 35 y 50°C, sin embargo, hubo variaciones que estaban condicionadas al funcionamiento del equipo. (c) *La velocidad*



de flujo del aire que es un factor que estuvo condicionado al diseño del equipo empleado y que se logró mantener a un nivel de 1.7 m/s.

En la tabla 4.4, se presenta un resumen de los datos recolectados para este proceso.

**TABLA 4.4 (a) RECOLECCION DE DATOS PARA EL SECADO SECADOR DE BANDEJAS DISCONTINUO, ESPECIE INDIGOFERA GUATEMALENSIS**

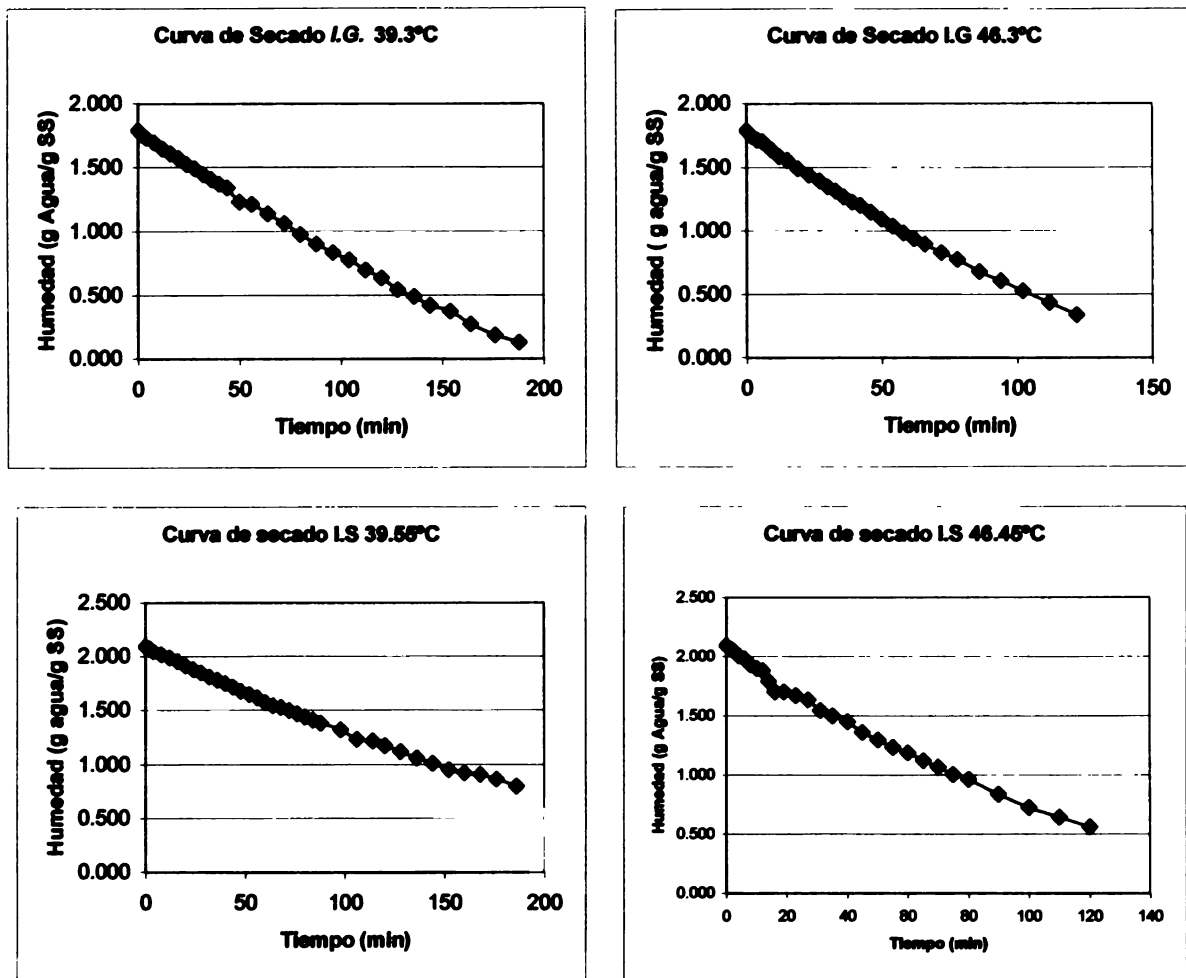
Progreso (min)	34.75°C			48.35°C		
	%humedad	%p/p de polvo	%Indigotina	%humedad	%p/p de polvo	%Indigotina
0	73.37	0.742	25.424	73.64	0.844	39.554453
10	60.37	0.562	30.072	56.93458	0.7	18.9165
40	49.897	0.366	26.354	40.01145	0.728	27.748056
90	41.895	0.628	20.776	30.11125	0.608	25.888781
150	36.129	0.752	23.565	20.16727	0.6	14.268313
230	28.915	0.596	21.705	17.79724	0.548	5.901575
300	28.024	0.54	11.015	15.76122	1.232	0.2307862

**TABLA 4.4 (b) RECOLECCION DE DATOS PARA EL SECADO EN SECADOR DE BANDEJAS DISCONTINUO, ESPECIE INDIGOFERA SUFRUCTICOSA**

Progreso (min)	34.75°C			48.35°C		
	%humedad	%p/p de polvo	%Indigotina	%humedad	%p/p de polvo	%Indigotina
0	73.37	0.354	43.552	73.37	0.47	20.776
10	60.37	0.316	43.087	60.37	0.51	0
40	49.897	0.416	12.409	49.897	0.372	21.241
90	41.895	0.476	19.846	41.895	0.576	24.773
150	36.129	0.536	24.03	36.129	0.4	0
230	28.915	0.41	40.298	28.915	0.336	0
300	28.024	0.3	15.198	28.024	0.422	0

En el gráfico 4.12, se presentan las curvas de secado para el secador de bandejas discontinuo usando las hojas de las especies guatemalensis y sufructicosa. Estas curvas fueron obtenidas a un flujo de aire de 1.7 m/s y a las temperaturas de 39.3 y 46.3 para la especie guatemalensis y de 39.55 y 4.45 para la especie sufructicosa.

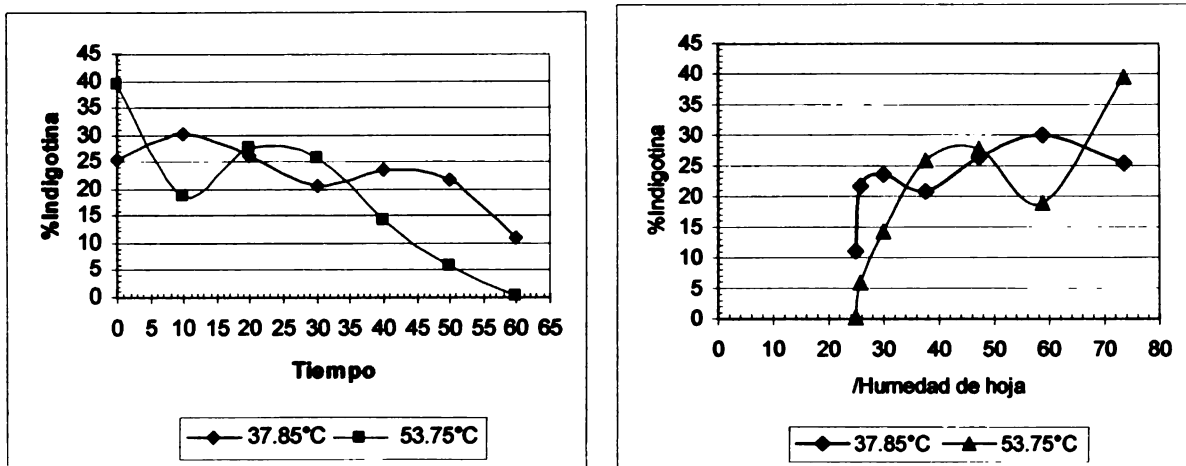




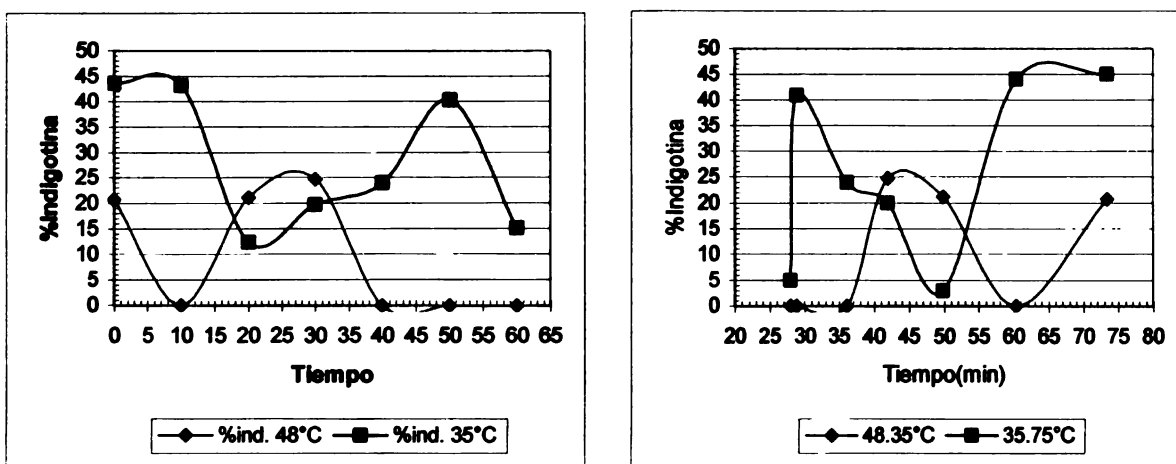
**GRAFICO 4.12 CURVAS DE SECADO PARA HOJAS DE LA PLANTA DE AÑIL EN EL SECADO DE BANDEJAS DISCONTINUO (VELOCIDAD DE FLUJO DE AIRE 1.7 M/S)**

En el gráfico 4.13 a y b, se presenta el comportamiento del porcentaje de indigotina con respecto al grado de avance en el tiempo y porcentaje de humedad de la hoja del proceso de secado en secador de bandejas discontinuo, para las especies *I. guatemalensis* e *I. sufruticosa* y para las dos temperaturas experimentadas en cada especie.





(a)



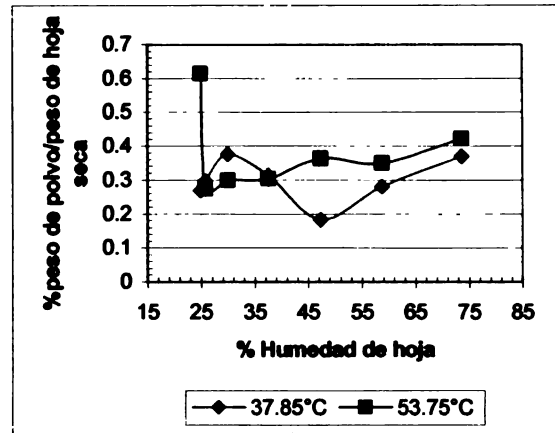
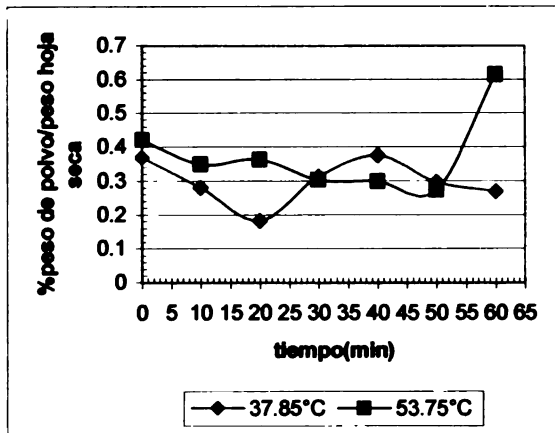
(b)

**GRAFICO 4.13 COMPORTAMIENTO DEL % DE INDIGOTINA RESPECTO AL GRADO DE SECADO DE LA HOJA EN SECADOR DE BANDEJAS DISCONTINUO: (a) I. GUATEMALENSIS; (b) I. SUFRUCTICOSA**

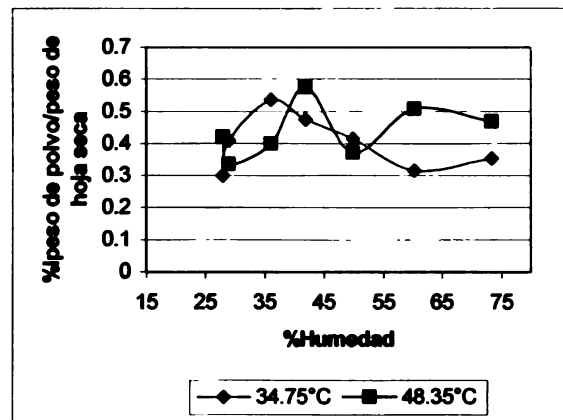
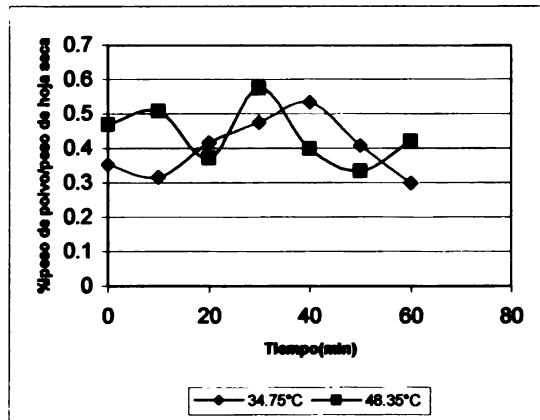
En el gráfico 4.14 a y b, se presenta el comportamiento del porcentaje en peso de colorante obtenido con respecto al grado de avance en el tiempo y porcentaje de humedad de la hoja del proceso de secado en secador de bandejas discontinuo, para las especies *I. guatemalensis* e *I. sufruticosa* y para las dos temperaturas experimentadas en cada especie.







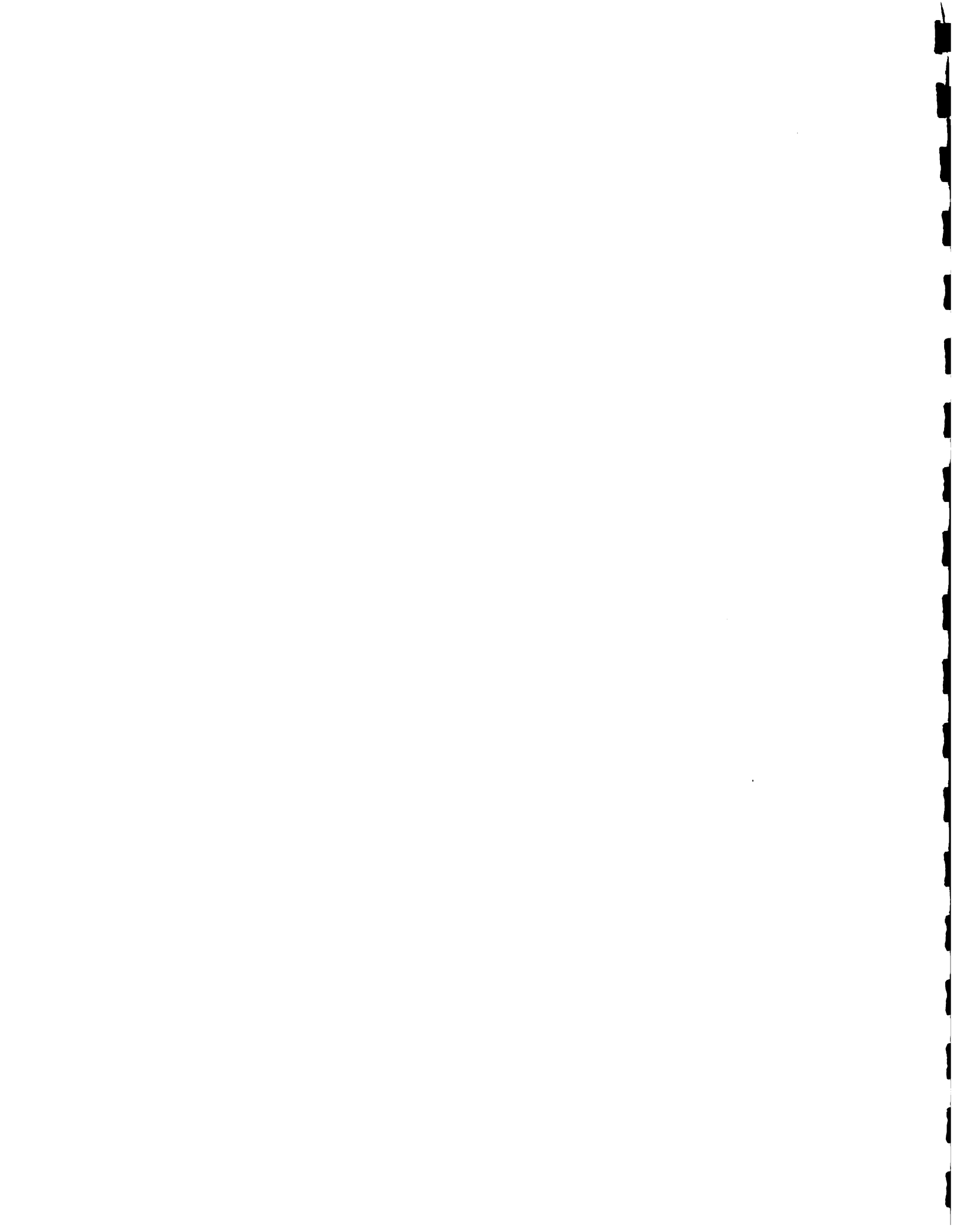
(a)

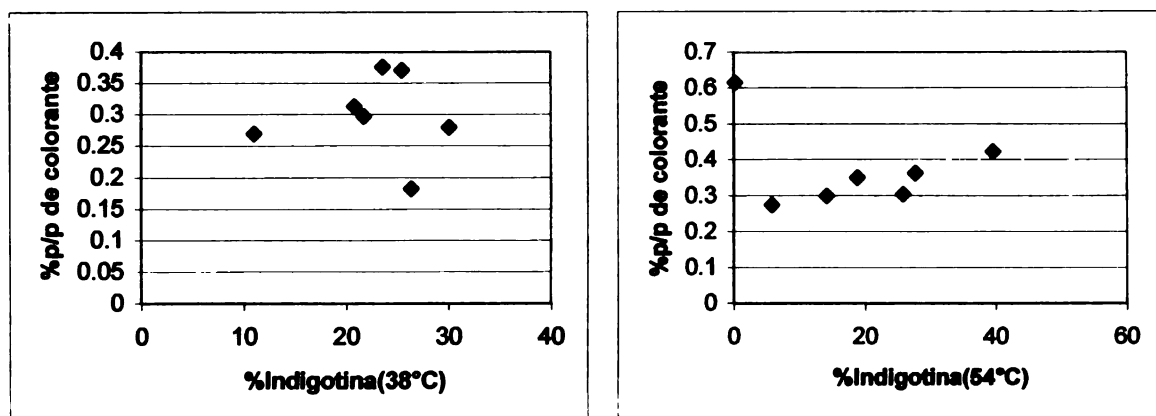


(b)

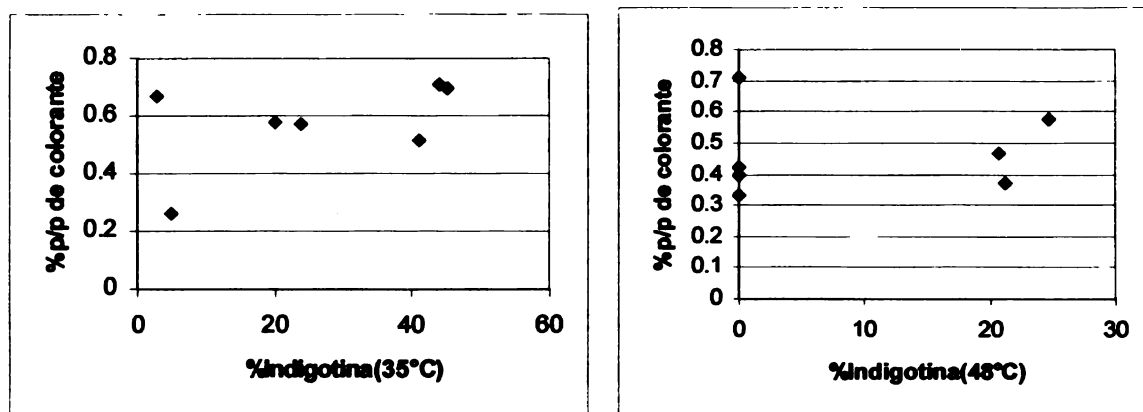
**GRAFICO 4.14 COMPORTAMIENTO DEL % p/p DE COLORANTE RESPECTO AL GRADO DE SECADO DE LA HOJA EN SECADOR DE BANDEJAS DISCONTINUO: (a) I. GUATEMALENSIS; (b) I. SUFRUCTICOSA**

En el gráfico 4.15, se presenta el diagrama de dispersión entre las características de calidad del colorante a las temperaturas experimentadas y para las dos especies de planta.





(a)

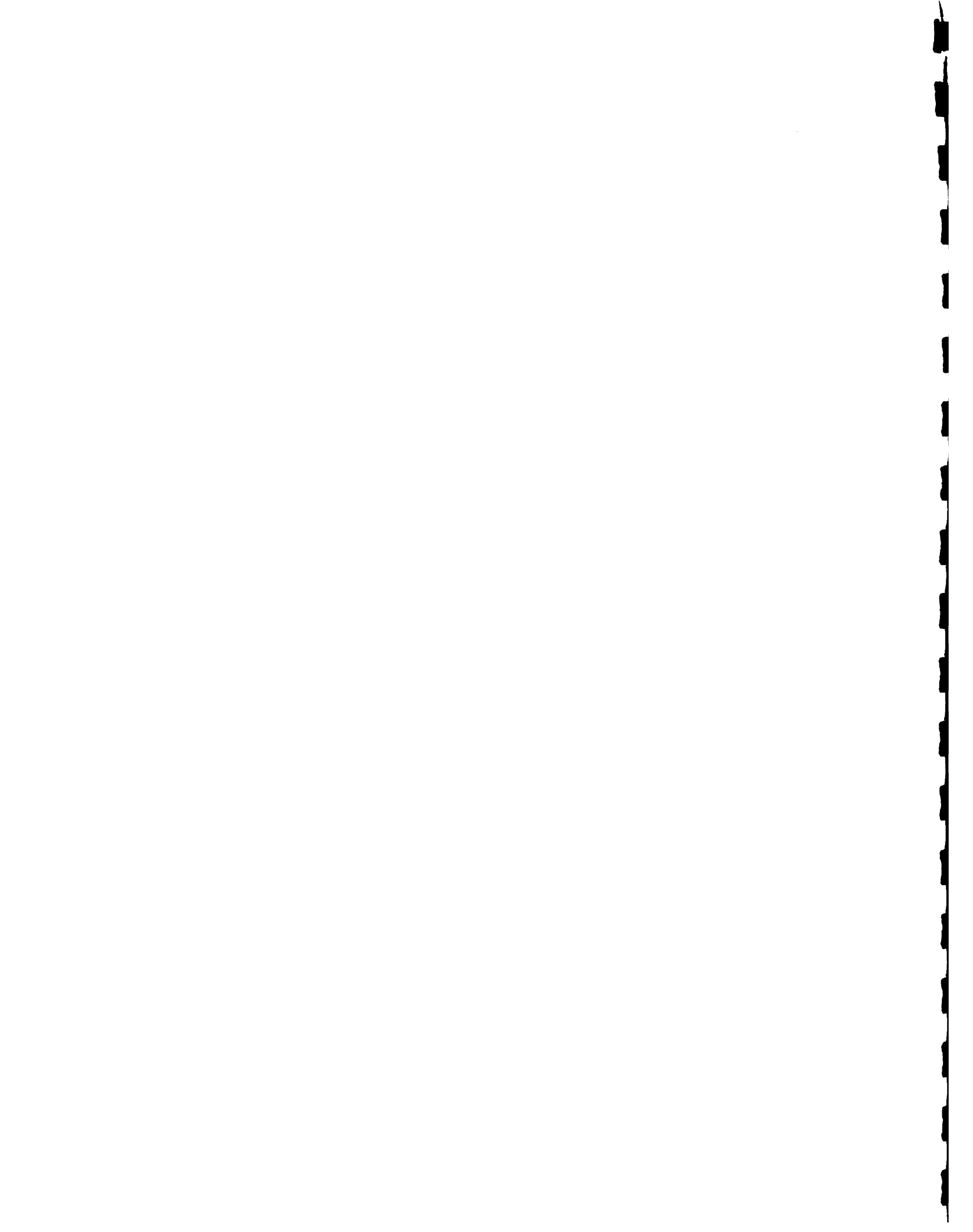


(b)

**GRAFICO 4.15 DIAGRAMA DE DISPERSION ENTRE LAS CARACTERISTICAS DE CALIDAD DEL COLORANTE: (a) *I. GUATEMALENSIS*; (b) *I. SUFRUCTICOSA***

A partir del gráfico 4.13a, puede observarse que el decaimiento en el porcentaje de indigotina, así como la inestabilidad de esta variable con el progreso del secado es mayor a la temperatura más alta, existiendo en general para la *I. guatemalensis* una correlación significativa al 5% para el comportamiento del porcentaje de indigotina con respecto al avance del proceso de secado, a las dos temperaturas experimentadas.

Por otra parte, para la *I. sufruticosa* no se encontró una correlación significativa al 5% entre el porcentaje de indigotina y grado de secado de la hoja, sin embargo, se



observa que el proceso de secado es bastante inestable en cuanto al comportamiento del porcentaje de indigotina.

Con respecto al comportamiento del porcentaje en peso del colorante obtenido con el avance del secado en el secador de bandejas (gráfico 4.14), se ha determinado que no existe una correlación significativa al 5% entre estas variables tanto para la *I. guatemalensis* como para la *I. sufruticosa*. El porcentaje en peso de colorante oscila en el intervalo de  $0.487 \pm 0.096$  %p/p para la especie guatemalensis y de  $0.421 \pm 0.048$  %p/p para la especie sufruticosa, observándose por tanto, mayor variabilidad para el caso de la especie guatemalensis.

Finalmente, puede concluirse que no existe una correlación significativa al 5% entre las características de calidad del colorante para ninguna de las especies y a ninguna de las temperaturas experimentadas (ver gráfico 4.15).

## **5.0 DIAGNOSTICO DEL EFECTO DEL USO DE HOJA SECA SOBRE LA CALIDAD DEL COLORANTE OBTENIDO**

Al hacer un análisis global sobre el efecto que tiene el uso de hoja seca sobre el comportamiento de las características de calidad del colorante obtenido, puede concluirse lo siguiente:

1. *Existe diferencia en el comportamiento del porcentaje de Indigotina del colorante obtenido en función del tipo de secado:* Según los resultados obtenidos el secado en estufa sin circulación de aire produce el comportamiento más estable en cuanto a esta característica para las temperaturas de 38 y 45°C, con respecto al secado solar y al secado en secador de bandejas (comparar gráficos 4.2, 4.10a y 4.13). El progreso del secado solar produce el decaimiento más significativo en el porcentaje de indigotina del colorante, sin embargo, es interesante observar que existe un



punto de máximo rendimiento con el avance del secado solar. Por otra parte, para el secado en el secador de bandejas se observa que a la menor temperatura se presentan tanto los mayores rendimientos en el porcentaje de indigotina como la mayor estabilidad en la variabilidad para esta característica.

2. *Existe diferencia significativa en el comportamiento del porcentaje en peso del colorante obtenido con respecto al tipo de secado:* comparando los gráficos 4.4, 4.10b y 4.14, puede observarse que el comportamiento del porcentaje en peso del colorante con respecto al tiempo de secado es más estable en cuanto a su variabilidad, en el proceso de secado en estufa a las temperaturas de 38 y 45°C, que en los otros dos tipos de secado, incluso se observa a estas temperaturas que el porcentaje en peso del colorante obtenido permanece prácticamente constante, para ambas especies. Sin embargo, hay que destacar que en el secado solar se observaron los mayores rendimientos a un determinado grado de avance del proceso (antes de 100 minutos) para ambas especies. En el secado en secador de bandejas se observó menor variabilidad de esta característica a la temperatura menor empleada y para ambas especies de planta.
3. *Existe una marcada influencia de la especie de planta sobre el comportamiento del porcentaje de indigotina y el porcentaje en peso de colorante con respecto al progreso del proceso de secado que es independiente del tipo de secado:* Pudo observarse que la especie *I. guatemalensis* produce un mayor rendimiento y una mayor estabilidad, en cuanto a la variabilidad, de ambas características de calidad del colorante obtenido que la especie *I. sufructicosa*, para los tres tipos de secado experimentados, como puede observarse en los gráficos 4.2, 4.4, 4.10, 4.13 y 4.14.





4. *No existe correlación significativa entre las características de calidad del colorante en función de ninguno de los tipos de secado y para ninguna de las especies de planta que fueron empleados:* Según los gráficos 4.5, 4.11 y 4.15, y según análisis estadístico no existe evidencia significativa al 5% como para afirmar que existe relación entre las características de calidad del colorante, es decir entre el porcentaje de indigotina y el porcentaje en peso, para ninguno de los tipos de secado, a ninguna de las temperaturas experimentadas y en ninguna de las especies de planta.
  
5. *Existe efecto significativo del aumento de la temperatura sobre el porcentaje de indigotina en el colorante extraído:* Se observó que tanto para el secado en estufa como para el secado en secador de bandejas (procesos en los que la temperatura era un factor de control), el aumento de la temperatura provoca, en general, una disminución e inestabilidad en el porcentaje de indigotina, obteniéndose incluso cero por ciento de indigotina en algunas muestras, volviéndose más notable para la especie *sufruticosa* en la que además se observaron cambios en la coloración del polvo obtenido. Este efecto negativo sobre las características del colorante al aumentar la temperatura puede deberse a la descomposición de los principios activos del colorante, produciéndose probablemente compuestos diferentes a la indigotina.
  
6. Dado que se han mantenido condiciones de repetitividad en los procesos de extracción y medición relacionados con el colorante, se concluye en este estudio, que el comportamiento y variabilidad de las características de calidad del colorante, son una función exclusiva de las variables involucradas en los distintos procesos de secado experimentados, así como de la naturaleza intrínseca de las diferentes especies de planta utilizadas. En el anexo B, se presenta un diagrama de causa efecto para explicar la



variabilidad de las características de calidad del colorante obtenido a partir de la hoja de la planta de añil.

7. Los resultados obtenidos en esta investigación reflejan la necesidad de llevar a cabo estudios más detallados de los procesos de secado experimentados aplicados a la hoja de la planta de añil. Estos estudios pueden ir orientados a determinar y cuantificar el efecto de los factores controlables y no controlables, propios de cada tipo de secado. Por otra parte, sería importante la creación de tecnología de conservación basada en los métodos de secado empleados en esta investigación.



## **ANEXO A PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE INDIGOTINA**

a) Para la muestra a analizar

1. En un mortero, moler una muestra del indigo a analizar hasta obtener un polvo fino. De este polvo, pesar en forma exacta 0.1 gr. de muestra ( $\pm 0.1$  mg) en la balanza y colocarla en un erlenmeyer de 125 ml, taparla adecuadamente usando un tapón de hule.
2. Añadir 30 ml (aproximadamente 47.5 gr) de perlas de vidrio (o perlas de ebullición), un agitador magnético y 30 ml de ácido sulfúrico concentrado 95 - 98% (se recomienda seguir el orden: Índigo, perlas, agitador magnético, ácido sulfúrico).
3. Remover la mezcla en un baño maría, durante 1½ hora, utilizando un hot- plate y conservando la temperatura a  $75 \pm 3^{\circ}\text{C}$ . Después, dejar enfriar el erlenmeyer con la mezcla, en agua con hielo, hasta que llegue a una temperatura aproximadamente de  $20^{\circ}\text{C}$ .
4. Preparar un balón volumétrico de 250 ml, conteniendo 50 ml de agua destilada, depositar la solución enfriada en el balón mediante un embudo (deben separarse las perlas de vidrio y el agitador, procurando que no caigan dentro del balón y cerciorarse de que no queden residuos de solución en las perlas ni en el agitador, esto se logra lavando el erlenmeyer y recolectando el agua de lavado en el balón). La solución se volverá caliente, dejar enfriar el balón con la mezcla en agua con hielo, hasta alcanzar una temperatura aproximadamente de  $20^{\circ}\text{C}$ . Luego, aforar con agua destilada hasta un volumen de 250 ml (la solución obtenida se llama solución de reserva).



5. Tomar una alícuota de 2 ml de la solución de reserva y colocarla en un balón de 100 ml, aforar con una solución de ácido sulfúrico al 5%.

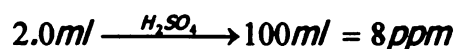
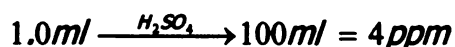
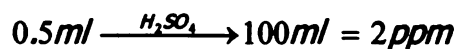
6. Medir la absorbancia correspondiente a dicha muestra a su máximo.

b) Para el estándar (añil sintético, marca Fluka al 98% de pureza).

Con el fin de encontrar una ecuación para el estándar, la cual servirá para determinar la concentración correspondiente a la muestra y con el objetivo de encontrar la longitud de onda máxima a la que el espectrofotómetro realizará las mejores lecturas, se procederá de la forma siguiente:

1. Seguir los pasos del 1 al 4 utilizados para la muestra a analizar.

2. Tomar 3 alícuotas de la solución estándar (preparada en el balón de 250 ml), colocar cada una de ellas en un volumétrico de 100 ml y aforar cada balón con solución de ácido sulfúrico al 5%. Estas soluciones serán preparadas de la siguiente manera:



Con estas concentraciones (soluciones) se debe encontrar la longitud de onda máxima a la que el espectrofotómetro realizará las mejores lecturas de la absorbancia, ésta puede variar entre 600 - 610 nm.

Una vez fijada la longitud de onda máxima (que depende del equipo que se tenga disponible), se procede a leer las absorbancias correspondientes para 2, 4, y 8 ppm, se aplica análisis de regresión a los valores obtenidos de absorbancia contra

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100



concentración (ppm) para el estándar al 98%. La ecuación obtenida para el modelo permitirá encontrar la concentración correspondiente a la muestra a analizar.

### c) CALCULOS

Con los datos obtenidos para la muestra y por medio de la ecuación que se obtiene para el estándar, se encuentra la concentración correspondiente a la muestra y se aplica la siguiente fórmula para encontrar su porcentaje de indigotina:

en donde:

$$\%Indigotina = \frac{ppm \times volumen \times f.d. \times 100}{W_m \times 10^6}$$

ppm = concentración de la muestra

volumen = volumen de la solución de reserva (250 ml)

f.d. = factor de dilución (2 en 100 = 50)

Wm = peso de la muestra

NOTA: El método original ha sido reducido a la cuarta parte



**ANEXO B DIAGRAMA DE ISHIKAWA PARA LA IDENTIFICACION DE LAS CAUSAS DE VARIACION DE LAS CARACTERISTICAS DE CALIDAD DEL COLORANTE DE AÑIL**

