

T.UES
1506
L7326
2002
Ej.1

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



**Optimización de la Extracción del Colorante de la Planta de Añil
(Indigofera sp.) para su Utilización en la Industria.**

PRESENTADO POR

ANA BEATRIZ LIMA SAGASTUME

ELVIRA ELENA MORALES CASTILLO

SARA ELISABETH ORELLANA CLAROS

PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERA QUIMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO DE 2002

15101039

15101039



2002-5226

Recibido el 14 de enero 2002

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA : **Dra. María Isabel Rodríguez**

SECRETARIA GENERAL: **Licda. Lidia Margarita Muñoz Vela**

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO : **Ing. Alvaro Antonio Aguilar Orantes**

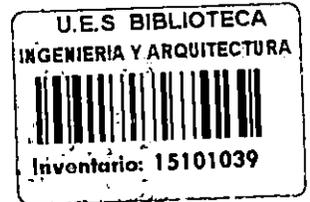
SECRETARIO : **Ing. Saúl Alfonso Granados**

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

DIRECTORA : **Ingra. Eugenia Salvadora Gamero Rodríguez**



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**



**Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:
INGENIERA QUIMICO**

Título:

**Optimización de la Extracción del Colorante de la Planta de Añil
(Indigofera sp.) para su Utilización en la Industria.**

Presentado por:

**Ana Beatriz Lima Sagastume
Elvira Elena Morales Castillo
Sara Elisabeth Orellana Claros**

Trabajo de Graduación aprobado por:

Coordinadora:

Ingra. Tania Torres Rivera

Asesores:

**Ingra. Eugenia Salvadora Gamero Rodríguez
Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya**

San Salvador, Enero de 2002

Trabajo de Graduación aprobado por:

Coordinadora :


Ingra. Tania Torres Rivera

Asesora :


Ingra. Eugenia Salvadora Gamero Rodríguez



Asesor :


Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todas aquellas personas e instituciones por su valiosa colaboración a la realización de éste trabajo, sin la cual su culminación no hubiese sido posible:

Ing. Tania Torres Rivera

Ing. Eugenia Salvadora Gamero Rodríguez

Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya

Dr. Mynor Gil

Ing. Bengt Bohnstedt

Sra. Rhina de Rehmann

Srita. Nadia Chalabi

Ing. Camilo Rodríguez

Proyecto de Fomento a la Integración de la Producción Agropecuaria y Agroindustrial (GTZ)

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

Asociación Salvadoreña de Procesadores de Productos No Tradicionales (AGRONATURA)

Grupo Añil de El Salvador

DEDICATORIA

A **DIOS** y a la **VIRGEN MARIA**, por haberme permitido lograr un éxito más en mi vida.

A mis padres, **CARLOS HUMBERTO** y **BERTA LIDIA**, gracias por darme en todo momento, su amor, cariño y apoyo, siendo mi fuente de inspiración. Gracias porque sin ustedes no hubiese sido posible alcanzar esta meta. Gracias papá y mamá.

A mis hermanas, **GLORIA PATRICIA**, **IRIS LISSETTE** y **CARMEN ELENA**, por el amor que siempre he recibido de su parte.

A **JOSE EDUARDO**, por ser una de las personas más importantes de mi vida, por enseñarme que en el camino hacia el éxito siempre existen tropiezos y que hay que saber levantarse, por el amor, respeto, cariño y comprensión recibido a través de toda nuestra relación. Con todo mi amor te dedico éste éxito. Te amo, mi amor.

ANA BEATRIZ

DEDICATORIA

A DIOS:

Por iluminar mi camino, por darme la razón para saber escoger mi futuro, por derramar sus bendiciones sobre mí y sobre todo por su maravilloso amor.

A MI MADRE:

Marta Elena de Morales, por su enorme apoyo, confianza, amor y comprensión que durante toda mi vida me ha regalado y por aquellos consejos que siempre me ha dado. Gracias mamá.

A MI PADRE:

Carlos Alberto Morales, por todo el sacrificio que ha hecho por mí para darme la oportunidad de ser profesional y sobre todo por su inmenso amor. Gracias papá.

A MIS HERMANAS:

Karla y Karen Morales, por tenerme paciencia en aquellos momentos en que más las necesité, por su amor y cariño. Gracias.

A MIS FAMILIARES Y AMIGOS:

Por su confianza, palabras de consejo y aliento que me han dado a lo largo de toda mi vida.

ELVIRA ELENA

DEDICATORIA

Antes que nada, quiero dar gracias a Dios por haberme permitido culminar esta meta y por dejarme estar aquí, ahora dedicando estas palabras, que no son mas que un profundo agradecimiento, por todas las muestras de apoyo y solidaridad que a lo largo de toda esta etapa de mi vida muchas de las personas que a continuación menciono me mostraron y supieron darme en el momento preciso.

Entre ellas tengo que destacar a mi querida madre, Paula Filomena Claros; que a pesar de desconocer la magnitud de las dificultades que tuve que enfrentar, siempre estuvo allí, dándome su apoyo y comprensión, y al mismo tiempo motivándome a seguir adelante, a mis queridos hermanos Lorena y Héctor, a esas personitas que sin yo pedirlo vinieron a alegrar y llenar mi vida, Carlitos, Rox, Paquito e Itito y a las personas que fueron parte fundamental de mi vida y que hoy desgraciadamente ya no están conmigo, para todos ellos es este triunfo.

También deseo expresar mi eterna gratitud, a mi amiga y compañera Karla Canjura, por todo su apoyo, y mas que todo por haberme brindado su amistad sincera y por estar conmigo en las buenas y en las malas, durante todo este tiempo.

A mis compañeras de tesis Ana Beatriz y Elvira, manifestarles que a pesar de todos los obstáculos que se nos presentaron, el haber trabajado y compartido durante todo este tiempo con ustedes ha sido una buena experiencia, al mismo tiempo les deseo éxitos y mucha suerte en todo lo que emprendan.

SARA ELISABETH

RESUMEN

Con el propósito de optimizar el actual proceso de extracción del colorante de la planta de añil, se realizó un trabajo experimental basado en un análisis estadístico, el cual fue desarrollado en dos partes, de tal forma que contribuyeran a identificar y cuantificar el efecto de factores que se consideraron de importancia en el proceso de extracción. Para ambas partes se necesitaba una variable de registro que indicara los factores que influían así como los niveles de éstos factores que vuelven óptimo el proceso. La mejor variable indicadora que se encontró fué el contenido de indigotina del colorante (componente primordial del indigo natural).

Como punto de partida para el inicio de esta investigación se realizó un cribado de variables, en donde se evaluaron los parámetros: masa de agua, temperatura, tipo de agua, tiempo, agente de fermentación, flujo de aire, peróxido de hidrógeno y hoja.

Del análisis estadístico realizado, los efectos más significativos sobre el contenido de indigotina fueron: masa de agua, tipo de hoja y agente de fermentación.

Dado que como agente de fermentación se utilizó caña de azúcar y la planta de caña de azúcar posee tanto glucosa como sacarosa, se efectuó un estudio sobre el efecto de la adición de éstos azúcares en la calidad del producto obtenido, presentando la glucosa porcentajes de indigotina mayores y con menor variabilidad en relación a los obtenidos con sacarosa.

Efectuando pruebas adicionales, se determinó que los niveles de las variables anteriores que nos permitirían iniciar la etapa de optimización son: nivel mínimo de masa de agua, correspondiente a la relación 1:20; nivel máximo de tipo de hoja, correspondiente al uso

de hoja fresca; nivel mínimo de glucosa que corresponde al 5% con respecto al tamaño de muestra.

Con el objetivo de buscar aquellos niveles de los factores con influencia significativa sobre el proceso que optimizan la extracción, se efectuó un análisis de superficie de respuesta, en donde las variables que se consideraron para éste análisis fueron aquellas que intervienen en la etapa donde se lleva a cabo la reacción química propiamente hablando, es decir, en la etapa de oxigenación, según los resultados obtenidos, los niveles de los factores a mantener en dicha etapa para que el proceso de extracción sea óptimo son: presión de 32.4 psi (6.8 pie³/min.) y un tiempo de 55 minutos. Para estas condiciones el contenido de indigotina estimado es del 58.43%.

Después de identificar y fijar los niveles de los factores que vuelven óptima la extracción del colorante, se procedió a diseñar una planta para la extracción del mismo, cuya capacidad de producción se ha considerado que será de 3 lbs. de polvo de añil, estimando que la planta puede trabajar 5 veces por semana durante un período total de producción de 6 meses, obteniendo con ello 360 lbs. de colorante por año. Las etapas que involucra el proceso serán:

- Etapa de fermentación: 18 horas
- Etapa de oxidación: 55 minutos
- Etapa de centrifugación: 2.23 segundos por batch.

También se identificaron las etapas del proceso de producción en las cuales se da la generación de desechos (sólidos y líquidos), recomendando para cada uno de ellos su posible tratamiento y/o disposición final.

Finalmente, el trabajo contempla el estudio económico del proyecto, el cual determina su factibilidad a partir de los parámetros que influyen en la rentabilidad de la misma.

INDICE

| Contenido | Pág. |
|---|------|
| INTRODUCCION..... | i |
| 1.0 HISTORIA DEL AÑIL..... | 1 |
| 1.1 Presencia del Añil en la Historia del Mundo..... | 1 |
| 1.2 El Añil de Mesoamérica en la Epoca Prehispánica y Epoca de la Conquista | 4 |
| 1.3 El Añil de Centroamérica en la Epoca Colonial y Epoca Moderna..... | 10 |
| 1.3.1 Siglo XVII..... | 11 |
| 1.3.2 Siglo XVIII..... | 16 |
| 1.3.3 Siglo XIX..... | 19 |
| 1.3.3.1 Invención de los Tintes Sintéticos..... | 21 |
| 1.3.4 Siglo XX..... | 23 |
| 1.4 Plantas de Indigo..... | 24 |
| 1.4.1 Plantas de indigo “falsas” | 33 |
| 1.5 Usos del Indigo a través de la Historia..... | 34 |
| 1.5.1 Usos Medicinales Directos del Indigo..... | 34 |
| 1.5.2 Tela Teñida con Indigo como Profiláctico..... | 37 |
| 1.5.3 Cosméticos..... | 37 |
| 1.5.4 Tatuajes | 39 |
| 1.5.5 Cabello y Barbas..... | 39 |
| 2.0 CONDICIONES ACTUALES DEL PROCESAMIENTO DE AÑIL EN EL | |
| SALVADOR..... | 42 |
| 2.1 Especies de Plantas de Añil Cultivadas en El Salvador..... | 43 |
| 2.2 Manejo Agronómico del Añil en El Salvador | 45 |
| 2.3 Procesamiento del Añil en El Salvador..... | 47 |
| 2.4 Mercado Mundial de Añil y Comercialización..... | 50 |
| 2.4.1 Requerimientos del Mercado Extranjero..... | 52 |
| 3.0 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCION DE LA | |
| EXTRACCION DEL COLORANTE DE LA PLANTA DE AÑIL..... | 55 |
| 3.1 Descripción de la Variable Respuesta..... | 56 |
| 3.1.1 Determinación del Contenido de Indigotina..... | 57 |
| 3.2 Desarrollo Experimental Pre-liminar..... | 63 |
| 3.2.1 Etapa 1: Cribado de Variables..... | 63 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.1.1 Elección de Posibles Factores que Afectan el Proceso de Extracción..... | 63 |
| 3.2.1.2 Mecanismo de la Experimentación..... | 64 |
| 3.2.1.3 Análisis Estadístico para el Cribado de Variables..... | 65 |
| 3.2.1.3.1 Estimación de los Efectos de los Factores sobre el Contenido de Indigotina | 69 |
| 3.2.1.3.2 Diagrama de Pareto..... | 72 |
| 3.2.1.4 Efecto de la Adición de un Carbohidrato que Incentive el Proceso de Fermentación..... | 74 |
| 3.2.2 Etapa 2: Establecimiento de los Niveles de los Factores más Significativos que permitan Iniciar la Etapa de Optimización..... | 78 |
| 3.2.2.1 aplicación de Análisis Estadístico para el Establecimiento de los Niveles de los Factores más Significativos..... | 79 |
| 3.2.2.1.1 Análisis de los Resultados..... | 81 |
| 3.3 Desarrollo del Proceso de Optimización..... | 84 |
| 3.3.1 Aplicación del Análisis de Superficie de Respuesta..... | 84 |
| 3.3.1.1 Aplicación de la Etapa de Primer Orden..... | 85 |
| 3.3.1.1.1 Diseño y Ensayos para la Etapa de Primer Orden | 85 |
| 3.3.1.1.2 Análisis de Resultados para la Etapa de Primer Orden..... | 86 |
| 3.3.1.1.3 Método de Máxima Pendiente..... | 90 |
| 3.3.1.2 Aplicación de la Estrategia de Segundo Orden..... | 92 |
| 3.3.1.2.1 Localización del Punto Estacionario..... | 97 |
| 3.3.1.2.2 Caracterización de la Superficie de Respuesta.... | 99 |
| 3.3.1.2.3 Obtención del Mejor Ajuste que Describe el Comportamiento del Contenido de Indigotina | 101 |
| 4.0 PROPUESTA DE DISEÑO PARA LA PLANTA DE EXTRACCION DEL COLORANTE DE LA PLANTA DE AÑIL..... | 103 |
| 4.1 Capacidad de Operación de la Planta..... | 104 |
| 4.2 Diseño del Tanque para la Fermentación..... | 104 |
| 4.3 Diseño del Tanque de aireación..... | 106 |
| 4.3.1 Compresor..... | 108 |
| 4.4 Etapa de Centrifugación..... | 108 |
| 4.5 Descripción del Proceso..... | 115 |

| | |
|---|-----|
| 5.0 IDENTIFICACIÓN DEL IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE GENERADOS POR EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL COLORANTE DE LA PLANTA DE AÑIL..... | 118 |
| 5.1 Identificación de los Desechos Generados..... | 118 |
| 5.1.1 Desechos Líquidos..... | 120 |
| 5.1.2 Desechos Sólidos..... | 121 |
| 5.2 Propuesta de Gestión de los Desechos Generados..... | 121 |
| 5.2.1 Desechos Líquidos..... | 123 |
| 5.2.2 Desechos Sólidos..... | 127 |
| 6.0 ANALISIS ECONOMICO DEL PROYECTO..... | 128 |
| 6.1 Determinación de la Inversión Total de Capital..... | 128 |
| 6.1.1 Inversión de Capital Fijo..... | 128 |
| 6.1.1.1 Costo de Equipo..... | 130 |
| 6.1.1.2 Tuberías y Accesorios..... | 131 |
| 6.1.1.3 Edificaciones (Incluyendo Servicios)..... | 131 |
| 6.1.1.4 Terreno..... | 132 |
| 6.1.1.5 Facilidades de Servicio..... | 132 |
| 6.1.1.6 Gastos de Construcción..... | 132 |
| 6.1.1.7 Costos de Instalación del Equipo Adquirido..... | 132 |
| 6.1.1.8 Instalaciones Eléctricas..... | 133 |
| 6.1.1.9 Ingeniería y Supervisión..... | 133 |
| 6.1.1.10 Contingencias..... | 133 |
| 6.1.2 Capital de Trabajo..... | 133 |
| 6.1.2.1 Costo Directo..... | 134 |
| 6.1.2.2 Costos de Administración..... | 136 |
| 6.2 Financiamiento. Tabla de Pago de la Deuda..... | 138 |
| 6.2.1 Características del Crédito..... | 138 |
| 6.3 Determinación de la Rentabilidad y Periodo de Recuperación..... | 140 |
| 6.4 Determinación del Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Rendimiento (TIR)..... | 142 |
| 6.4.1 Valor Presente Neto (VPN)..... | 142 |
| 6.4.2 Tasa Interna de Rendimiento (TIR)..... | 144 |
| OBSERVACIONES..... | 146 |
| CONCLUSIONES..... | 147 |
| RECOMENDACIONES..... | 149 |

| | |
|---|-----|
| REFERENCIAS..... | 151 |
| ANEXOS..... | 155 |
| Anexo A, Diseño y Analisis de Experimento..... | 156 |
| Anexo B, Metodo Analítico para la Determinación del Contenido de Indigotina..... | 165 |
| Anexo C, Pruebas y Estimaciones de las Medias de Poblaciones cuando σ no se Conoce..... | 169 |
| Anexo D, Resultados de los Ensayos de las Muestras de Indigotina..... | 172 |
| Anexo E, Tablas t Valor..... | 175 |
| Anexo F, Puntos Porcentuales de la Distribución F..... | 176 |
| Anexo G, Analisis de Superficie de Respuesta..... | 177 |
| Anexo H, Memoria de Cálculo..... | 188 |
| Anexo I, Resultados de Análisis Fisicoquimicos Realizados en Muestra de Agua Proveniente del Proceso de Extracción de Añil | 193 |
| Anexo J, Análisis Químico de Hojas de Jiquilite Agotadas..... | 195 |
| Anexo K, Cuadro de Costos Provisional. Costos de Producción de Jiquilite (Añil) Indigofera sp. 2 ^{do} Año – Mantenimiento de la Plantación – 1 Mz | 196 |
| Anexo L, Resultados de Análisis Fisicoquímicos Realizados a las Aguas de Desecho Provenientes del Análisis de Indigotina..... | 197 |

INDICE DE TABLAS

| Tablas | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1.1 Producción de Añil: 1791-1800..... | 18 |
| Tabla 2.1 Listado de Productores de Añil del Proyecto Añil de El Salvador..... | 43 |
| Tabla 2.2 Clasificación Botánica de las Plantas de Añil cultivadas en El Salvador.. | 44 |
| Tabla 2.3 Manejo Agronómico de la Planta de Añil en El Salvador | 46 |
| Tabla 2.4 Procesamiento de Añil en El Salvador..... | 49 |
| Tabla 2.5 Precios de Venta del Añil en el Mercado Europeo..... | 53 |
| Tabla 3.1 Resultados Obtenidos en la Determinación del Contenido de Indigotina con el Método con una reducción de ¼..... | 58 |
| Tabla 3.2 Resultados de los Promedios, Desviaciones Estándar y Estadísticos de Prueba encontrados para cada Muestra..... | 61 |
| Tabla 3.3 Límites de Confianza de μ para las Muestras analizadas..... | 62 |
| Tabla 3.4 Posibles Factores que Afectan el Proceso de Extracción..... | 63 |
| Tabla 3.5 Etapa 1: Codificación de los Factores en Estudio..... | 66 |
| Tabla 3.6 Etapa 1: Niveles de los Factores y sus Codificaciones..... | 67 |
| Tabla 3.7 Etapa 1: Resultados Obtenidos..... | 68 |
| Tabla 3.8 Constantes de Contraste para el Diseño | 70 |
| Tabla 3.9 Etapa 1: Cálculo de las estimaciones de los efectos..... | 71 |
| Tabla 3.10 Resultados Obtenidos sobre el Efecto de la Adición de Glucosa en el Proceso de Fermentación..... | 75 |
| Tabla 3.11 Resultados Obtenidos sobre el Efecto de la Adición de Sacarosa en el Proceso de Fermentación..... | 75 |
| Tabla 3.12 Etapa 2: Codificación de los Factores en Estudio..... | 80 |
| Tabla 3.13 Etapa 2: Niveles de los Factores y sus Codificaciones..... | 80 |
| Tabla 3.14 Etapa 2: Resultados Obtenidos..... | 81 |
| Tabla 3.15 Etapa 2: Cálculo de las estimaciones de los efectos..... | 81 |
| Tabla 3.16 Codificación de los Factores en Estudio para la Etapa de Primer Orden. | 85 |
| Tabla 3.17 Niveles de los Factores y sus Codificaciones para la Etapa de Primer Orden..... | 85 |
| Tabla 3.18 Resultados Obtenidos en la Etapa de Primer Orden..... | 86 |
| Tabla 3.19 Cálculo de las estimaciones de los efectos en la Etapa de Primer Orden..... | 86 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Tabla 3.20 | Análisis de significancia de los Parámetros del Modelo de Primer Orden..... | 88 |
| Tabla 3.21 | Análisis de Varianza del Modelo General de Primer Orden..... | 89 |
| Tabla 3.22 | Ruta en Ascenso para el Factor Tiempo..... | 90 |
| Tabla 3.23 | Experimentos Adicionales a lo Largo de la Ruta en Ascenso para el Factor Tiempo..... | 91 |
| Tabla 3.24 | Niveles de los Factores y sus Codificaciones para la Estrategia de Segundo Orden..... | 93 |
| Tabla 3.25 | Codificación de los Factores en Estudio para la Estrategia de Segundo Orden..... | 93 |
| Tabla 3.26 | Resultados Obtenidos en la Etapa de Segundo Orden..... | 94 |
| Tabla 3.27 | Análisis de Significancia de los Parámetros del Modelo de Segundo Orden..... | 95 |
| Tabla 3.28 | Análisis de Varianza del Modelo General de Segundo Orden..... | 95 |
| Tabla 3.29 | Coefficientes de Regresión para el Modelo Cuadrático..... | 98 |
| Tabla 3.30 | Análisis de Regresión Múltiple para el Modelo Ajustado..... | 101 |
| Tabla 3.31 | Análisis de Varianza para el Modelo Ajustado..... | 101 |
| Tabla 4.1 | Especificaciones del Tanque de Fermentación..... | 105 |
| Tabla 4.2 | Especificaciones del Tanque de Aireación..... | 106 |
| Tabla 4.3 | Especificaciones del Compresor..... | 108 |
| Tabla 4.4 | Técnicas Claves para Procesos de Separación y su Rango de Aplicación..... | 109 |
| Tabla 4.5 | Especificaciones de la Centrífuga..... | 114 |
| Tabla 5.1 | Resultados de Análisis Físicoquímicos realizados en muestra de agua Proveniente del proceso de Extracción del Añil..... | 120 |
| Tabla 5.2 | Resultados de los Análisis efectuados en las muestras de hoja de la Planta de Añil..... | 121 |
| Tabla 5.3 | Información Típica para Tanques de Flocculación..... | 126 |
| Tabla 5.4 | Información Típica de los Tanques de Sedimentación Rectangulares y Circulares utilizados para el Tratamiento Primario de Agua Residual..... | 126 |
| Tabla 6.1 | Costo por Equipo para el Año 2001..... | 130 |
| Tabla 6.2 | Costo de Tuberías y Accesorios..... | 131 |
| Tabla 6.3 | Presupuesto para el Capital de Trabajo para el Primer Año de Operaciones..... | 136 |
| Tabla 6.4 | Inversión Total de Capital..... | 137 |

Tabla 6.5 Características del Crédito..... 138
Tabla 6.6 Tabla de Pago de la deuda..... 139

INDICE DE FIGURAS

| Figura | Pág. |
|--|------|
| Figura 1.1 El Indigo de El Salvador..... | 11 |
| Figura 1.2 Pilas del siglo XVII, descubiertas en una excavación Arqueológica en San Andrés, El Salvador..... | 13 |
| Figura 1.3 <u>Indigofera tinctoria</u> cultivada en Ba Saang Sa cerca de Nong Khai, Nordeste de Tailandia, 1991..... | 27 |
| Figura 1.4 <u>Isatis tinctoria</u> , o Woad (pastel), primer año de la planta, Devon, 1996... | 29 |
| Figura 1.5 <u>Polygonum tinctorium</u> , Tokushima, Japón, 1993..... | 30 |
| Figura 1.6 <u>Lonchocarpus cyanescens</u> creciendo en forma silvestre en Nigeria..... | 32 |
| Figura 1.7 Mujer de la tribu Jiddat Harasis, Oman, 1988..... | 38 |
| Figura 1.8 Productos basados en Indigo, producidos en Pakistan y la India..... | 41 |
| Figura 3.1 Proceso de Transformación del Indicán a Indigo (Esquivel, 1983)..... | 56 |
| Figura 3.2 Diagrama de Flujo del Proceso General de Extracción del Colorante de la Planta de Añil..... | 64 |
| Figura 3.3 Etapa 1: Gráfica de Probabilidad Normal de los Efectos..... | 72 |
| Figura 3.4 Etapa 1: Diagrama de Pareto..... | 73 |
| Figura 3.5 Planta a Escala de Banco para la Extracción del Colorante de la Planta De Añil..... | 79 |
| Figura 3.6 Etapa 2: Gráfica de Probabilidad Normal de los Efectos..... | 82 |
| Figura 3.7 Etapa 2: Diagrama de Pareto..... | 82 |
| Figura 3.8 Gráfico de Efectos Principales..... | 83 |
| Figura 3.9 Gráfica de Probabilidad Normal de los efectos para la Etapa de Primer Orden..... | 87 |
| Figura 3.10 Diagrama de Pareto para la Etapa de Primer Orden..... | 87 |
| Figura 3.11 Gráfica de Tendencia de Residuos..... | 96 |
| Figura 4.1 Diagrama de Flujo del Sistema de Extracción Propuesto..... | 103 |
| Figura 4.2 Tanque para la Fermentación..... | 105 |
| Figura 4.3 Tanque de aireación..... | 107 |
| Figura 4.4 Difusores..... | 107 |
| Figura 4.5 Centrífuga Batch. Esquema Básico..... | 111 |
| Figura 4.6 Vista Seccional de la Centrífuga Batch..... | 114 |
| Figura 4.7 Diseño de la Planta de Extracción Propuesta..... | 116 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.8 Instalaciones Eléctricas..... | 117 |
| Figura 5.1 Diagrama de Flujo de la Gestión de Desechos Sólidos y Líquidos..... | 122 |

INTRODUCCION

Durante muchos años en El Salvador, el añil fue el principal producto agrícola, y su explotación fue tan próspera que llegó a ser la base económica de todo el país.

A un siglo de su apogeo, el cultivo y procesamiento de añil vuelve a considerarse como una opción viable ante la crisis actual de los cultivos tradicionales.

Se tiene conocimiento que desde 1993 hasta la fecha, se ha estado cultivando y procesando añil en forma artesanal, es decir, mediante el método tradicional de obrajes, sin que exista una técnica de producción específica, ya que la extracción y producción de éste se ha basado en experiencias empíricas de algunas personas, las cuales a su vez se basan en conocimientos que han sido transmitidos a través de la historia.

Por lo anterior, las prácticas de obtención en cada uno de los obrajes existentes varían desde el cultivo y manejo, hasta la extracción y procesamiento, lo cual incide en la variabilidad de la calidad del añil que se obtiene.

En nuestro país, a pesar de procesar añil, no existe ninguna investigación científica orientada a mejorar la producción artesanal actual, por lo que se han tenido diversidad de problemas entre los que sobresalen los rendimientos bajos de producción y de calidad final del producto.

Es por ello que se hace necesario iniciar un proceso de investigación en esta área, que contribuya a definir parámetros técnicos de procesamiento que además de mejorar la calidad y el rendimiento del producto, evitaría la variabilidad de la calidad del mismo, ya

que los diferentes obrajes estarían trabajando bajo las mismas condiciones y de ésta manera se estandarizaría el proceso.

Es así, como con el presente estudio se pretende definir de una manera técnico-científica los principales factores que intervienen en el procesamiento del añil y a su vez, fijar los niveles de los mismos que vuelvan óptimo dicho procesamiento, todo esto a través de la aplicación de la técnica estadística conocida como Diseño de Experimentos. Además, también se diseñará la planta de extracción del colorante y se evaluará la rentabilidad del proyecto.

1.0 HISTORIA DEL AÑIL

1.1 Presencia del Añil en la Historia del Mundo

En toda la historia de la humanidad, no ha existido otro colorante tan preferido y utilizado en todo el mundo y en tan grandes cantidades como el añil.

Se estima que el cultivo de la planta de añil empezó desde la época prehistórica. En Egipto en la IV dinastía (2200 años A.C.) ya se empleaba el añil y es bien sabido que en tiempo de los Tolomeos los romanos compraban a elevados precios telas teñidas con esa sustancia en el Valle de Nilo. En India también se cultivaba ya en los años 2000 a. C. y en el siglo I a. C. se exportaba a los países del Mediterráneo y Grecia el colorante "indigo" que es Indicum en latín y significa "el que vino de India".

Pero los griegos y romanos, en esa época tenían otra clase de añil que era el pastel de Woad (*Isatis tinctoria L.*) de la familia *Cruciferae* cultivada entonces en Europa y al parecer, ellos consideraban el índigo como un mineral y lo empleaban, antes que todo, como medicina o color para pintar. Los judíos de los tiempos bíblicos también lo utilizaban y hay documentos que mencionan que todavía en el siglo XIV se encontraban los campos cultivados de añil en la tierra de Jericó (RUBIO SANCHEZ, 1976, p.16).

En tiempo de las Cruzadas se introdujo en Italia el arte de teñir las telas con añil, arte que poco a poco se propagó por el resto de Europa. Sin embargo, durante la época medieval, el añil no fue aceptado con rapidez, debido a su elevado precio. Los tintoreros italianos lo llamaban "índigo fino de Bagdad", ya que el índigo elaborado en la India fue llevado primero a Bagdad que en aquella época, era el centro de comercio entre Europa y Asia, y fue vendido por los comerciantes pérsicos a los de Venecia. El nombre del color "Persian

Blue" (azul púrpura, azul oscuro) también nos indica que el comercio del índigo de entonces estaba en las manos de los comerciantes púrpura.

En 1477, se dio a conocer el procedimiento indiano del añil en Europa, gracias a la publicación del **Libro de Marco Polo**, pero aún cuando se conoció que el colorante era extracto de una planta, prosiguió la creencia de que el añil era sustancia mineral y que había hasta un gobierno que emitía la concesión minera (GOTO, 1974, p.93).

Durante la época de grandes descubrimientos geográficos, fueron creadas las Compañías de las Indias Orientales, primero por los portugueses y luego por los holandeses e ingleses, quienes llevaron a Europa el añil junto con las especias en cantidades cada vez mayor. A medida que se iba conociendo el añil índigo en Europa, la técnica de teñir también fue cambiándose. Pero, los fabricantes de pastel, que es un colorante tradicional extraído del *Isatis tinctoria L.* y que servía hasta entonces para teñir de azul los tejidos, empezaron hacer cruda guerra al índigo. Y los gobernantes prohibieron la importación y el uso del añil índigo para proteger el pastel de su país y tomaron medidas extremadamente duras. En Francia, por ejemplo, impusieron graves multas a los comerciantes o tintoreros que violasen las leyes de la prohibición (1599) y Enrique IV (1533-1610) de los Borbones condenó a la pena capital a los industriales que empleasen el índigo. En Alemania también se prohibió rigurosamente el uso de esa "droga falsa y perniciosa", en Nuremberg era costumbre que los tintoreros, en día señalado y con las ceremonias de rúbrica, se juramentasen todos los años comprometiéndose a no emplear en su industria "el tinte de diablo", nombre con que se designó el añil (RUBIO SANCHEZ, 1976, p.18).

A pesar de todas estas dificultades, el uso del añil se generalizó cada vez más debido a su incomparable calidad como colorante, la cual no tenía el pastel. Finalmente en 1737,

cuando el científico francés Dufai aclaró que el añil era inofensivo contra la salud humana, el consumo del mismo había sido declarado libre primero en Francia y luego en toda Europa.

Después del triunfo de añil índigo en la guerra contra el pastel de Europa, la importancia de ese colorante creció rápidamente y el que satisfizo la crecida demanda aunque parcialmente, era el añil del nuevo continente.

España había empezado a exhortar el cultivo de *I. Suffruticosa Mill.* en el nuevo continente desde que recién lo había conquistado. Inglaterra y Francia también tenían grandes campos cultivados de añil en sus dominios de las Islas de las Indias Occidentales, y sólo en la Isla de Santo Domingo en 1787, contaban 3,150 fincas de añil (IBID., p.94). Además, Inglaterra estaba importando el añil de sus colonias de Carolina del Sur fundadas a principios del siglo XVIII , y esta importación siguió hasta 1783, año de la independencia de los Estados Unidos de América. Posteriormente (desde el principio del siglo XIX), los ingleses que emigraron a India también gozaron la prosperidad, gracias a los grandes beneficios sacados del cultivo del añil. Y por el esfuerzo y dedicación del gobierno inglés a este cultivo, India resucitó nuevamente en la historia del mundo como principal país productor del añil.

Por la aparición de Napoleón cambió grandemente la situación política y económica de los países de Europa. España empezó a decaer rápidamente e Inglaterra en cambio, aprovechando esta caótica circunstancia, logró la monopolización sustancial del comercio de añil. Estos movimientos en Europa no dejaron de tener grandes influencias en la industria de añil en Centroamérica.

Francia, en competencia con Inglaterra, trató de enderezar la situación resucitando el famoso pastel. Y en 1810, Napoleón I ofreció un premio de 425,000 francos por la exploración del nuevo método de teñir con pastel y el descubrimiento del colorante de azul más hermoso y fijo que el añil índigo, pero su deseo nunca fue realizado.

Finalmente, el añil llegó a ocupar el primer lugar de todos los colores empleados por las industrias textiles europeas. Su gloria, sin embargo, no duró largo tiempo, ya que cuando el precio llegó a su pico, apareció el añil sintético que nació del alquitrán. El añil siguió el mismo curso de decaimiento que tomó el pastel de antaño.

1.2 El Añil de Mesoamérica en la Época Prehispánica y Época de la Conquista

En cuanto al añil de la época prehispánica, parece que hubo muchas discusiones en los tiempos pasados. La polémica comenzó por el argumento que hizo el Padre Raynal en su libro **Historia filosófica de los establecimientos y del comercio de los europeos en las dos indias** (Amsterdam, 1770), pretendiendo que los españoles fueron los que enseñaron a los americanos la manera de beneficiar el jiquilite. Pero Clavijero le opuso de frente y escribió en el Libro VII, artículo 45, de su **Historia de México antes y después de la conquista española**, que "todos los escritores de América que he habido a las manos, no he hallado uno solo, que pueda servir de apoyo a la opinión de Raynal" y aseguró que todos los cronistas de México sabían "el uso del Jiquilite en los toltecas".

El español Francisco Hernández, naturalista y médico, viajó por México desde 1570 hasta 1577 y efectuó el estudio de la medicina tradicional entre los indígenas reuniendo varias muestras de plantas medicinales. Hernández dice, en su libro que publicó después de su regreso a España: "los antiguos mexicanos sabían hacer uso de aquel preciso

vegetal (Jiquilite)" (RUBIO SANCHEZ, 1976, p.15). Fernando Colón también constan en su testimonio que "una de las plantas propias de la Isla Española era el añil, aunque el modo de prepararlo entonces se diferenciaba mucho del moderno" (IBID., p.15).

El descubridor de la Corriente de Humbolt, el célebre alemán, Alexander von Humboldt acepta en su **Ensayo Político sobre Nueva España** (Lib. IV, cap. 10) la opinión de Clavijero, y añade en apoyo de ella que, "las pinturas jeroglíficas mejicanas son auténtica prueba de que los antiguos nativos hacían uso del añil", y refiere además, que treinta años después de la conquista los españoles residentes en México a falta de otros ingredientes mejores para hacer tinta de escribir, "empleaban para ello el añil" (IBID., p.15).

M. Luciano Biart describió la manera cómo fabricaban el añil los antiguos aztecas en su libro **Les Azteques** (París, 1885) y dijo que "echaban una por una las hojas de la planta en un vaso lleno de agua tibia; después, tras prolongada remoción del líquido, lo dejaban reposar. Extraían después el agua del vaso con el mayor cuidado, y en seguida secaban al sol el depósito y por último lo calentaban para endurecerlo". Si la observación es exacta, ésta puede ser una variedad del método de precipitación.

En la actualidad, está comprobada científicamente la existencia de unas especies de añil de origen del nuevo continente y que una de las cuales; *I. Suffructicosa Mill.*, contiene más cantidad de Indican que *I. tinctoria L.* de origen indiano, y naturalmente ha sido utilizada por los indígenas desde los tiempos remotos. Hay varios autores que dicen que el añil del nuevo continente es *I. tinctoria L.* que fue introducido de India y cultivado por los españoles. Es cierto que esta especie fue introducida temporalmente al nuevo continente, sin embargo fue rechazado en poco tiempo por su poco contenido de Indican en comparación con *I. suffructicosa Mill.* (STANDLEY & WILLIAMS, Part V, 1961, p.272).

Las primeras menciones concretas que se han hecho durante la época prehispánica del añil o Jíquillite se encuentran en el **Libro de Chilam Balam** que, aunque fue redactado después de la conquista española, valiéndose del alfabeto castellano, igual que el **Popol Vuh**, libro sagrado de los mayas de Guatemala, en él se transmiten todas las fases culturales por las que fue pasando el pueblo maya de Yucatán. Aunque es bastante difícil comprenderlo por tratarse de las profecías, así se dice en los "Textos proféticos de Katunes aislados : Profecía en un 13 Ahau";

".... Sufrirá padecimientos Ah Canul, El guardián, entonces será cuando se tiñan de añil unos y otros por padecimientos de Ah Canul, El guardián; estucarán con pintura los Canules, Guardinaes; con ellos soltará su carga " (EL LIBRO DE LOS LIBROS DE CHILAM BALAM, 1965, p. 86).

La referencia a "entonces será cuando se tiñan de añil " halla confirmación, como una costumbre, en la **Relación de las cosas de Yucatán** de Fray Diego de Landa, diciendo que el embadurnamiento con la pasta azul hecha de añil llamada en maya Ch'oh, se relacionaba con ritos de la fecundidad, es decir, con el ritual agrícola. Refiere Landa en su capítulo sobre los sacrificios humanos, una especial manera de matar en la cual entraba el embadurnarse con pasta azul de añil : "... y si había de ser sacrificado a saetadas, desnudábanle en cueros y untábanle el cuerpo de azul, con una coraza en la cabeza; subíanle en el palo y atábanle y haciendo cierta señal a los bailantes, le comenzaban flechar por orden del sacerdote ... al corazón " (LANDA, 1966, p.50).

Así mismo, si le habían de sacar el corazón, "le traían embadurnado de azul y coraza puesta, llevaban a la grada redonda, que era el sacrificadero; y, después que el sacerdote y sus oficiales untaban aquella piedra con color azul y echaban, purificando el templo, al demonio, tomaban los chaces al pobre que sacrificaban, y con gran presteza le ponían de

espaldas en aquella piedra y asíanle de las piernas y brazos todos cuatro, que le partían por medio " .

También da el mismo cronista noticias de la pasta azul de añil en las ceremonias del mes Yaxkín : "... llamábala Olob-Zab-Kamyax. Lo que después, juntos en el templo y hechas las ceremonias y sahumeros que en las pasadas hacían, pretendían era untar con betún azul que hacían, todos los instrumentos de todos los oficios, desde el sacerdote hasta los husos de las mujeres y los postes de sus casas " (IBID., p.99); y finalmente, en ceremonias del ritual agrícola efectuadas en el mes Mac: "Esto hecho con su devoción acostumbrada, untaban el primero escalón del montón de las piedras con el lodo del pozo, y los demás escalones con betún azul, y echaban muchos sahumeros y invocaban a los Chaces y a Izamná con sus oraciones y devociones, y ofrecían sus presentes " (IBID., p.79).

El nombre científico de la planta llamada Ch'oh, en Yucatán de la que Landa describió es *I. suffruticosa Mill.*, es decir jiquilite, el añil que está difundido ampliamente por todo el continente de América. Por consiguiente, la pasta azul mencionada frecuentemente por Landa, que se hacía de Ch'oh, era el lodo de añil, o sea el añil indigo.

Gonzalo Fernández Oviedo, cronológicamente el primer naturalista de la ciencia americana, en el **Sumario de la Historia Natural de las Indias** (1526), al hacer relación "De las plantas y Yervas", concluye : "Y pues ya estoy al fin en esta relación de lo que se me acuerda de esta materia, quiero decir otra cosa que me ocurre, y no es fuera de ella; lo que los indios hacen de ciertas cáscaras y cortezas y hojas de árboles que ya ellos conocen y tienen para teñir y dar colores a las mantas de algodón, que ellos pintan de negro y leonado y verde y azul y amarillo y colorado o rojo, tan vivas y subidas cada una, que no puede ser más en perfección". Con gran probabilidad se trata de una de las

primeras noticias acerca del uso de colorantes y colores por los indígenas de las Islas de las Indias Occidentales. Los colores mencionados son casi los mismos que los centroamericanos consideraban sagrados, y la planta con que se tiñó el color azul y verde (azul con amarillo) fue indudablemente el jiquilite que abundaba en el Caribe, Centroamérica y América del Sur.

En julio de 1558, el Rey de España emitió la Real cédula al Presidente e oidores de la Audiencia Real de los Confines, en la que se manifiesta su gran interés sobre jiquilite o lodo de añil.

La real Audiencia mandó una detallada descripción de lo solicitado por el Rey, quien al parecer la transmitió a personas doctas en la materia, las cuales después de pedir nuevos informes y estudiar la planta dieron su informe que posteriormente el Rey por medio de la Real cédula dictara la mejor conveniencia de procesar el añil, a fin de comercializarlo en Centroamérica.

Antonio de Ciudad Real, quien viajó por México y Centroamérica de 1584 a 1589, puso en claro que la planta de la cual extraían el añil era del nuevo continente en su **Tratado curioso y docto de las grandezas de la Nueva España** : y dice “.... y beneficiase por allí (Provincia de San Salvador) el añil, que son unas matas naturales de aquella tierra, de las cuales cultivadas se saca mucha de aquella tinta hecha en unos panecillos cuadrados, no muy grandes ni muy grueso” (CIUDAD REAL, I, 1976, p. 245).

Sería Bernardino de Sahagún, el que con toda certeza dejara muchas descripciones sobre el uso de añil entre los indígenas de la época de conquista cuando escribía **La Historia General de las cosas de Nueva España** (12 tomos, 1569) . En el capítulo XI, del Libro XI, que trata “De los colores de todas maneras”, dice : “Hay una yerba en las

tierras calientes que se llama xiuhquilitl, majan esta yerba y exprímenle el zumo, y échanlo en unos vasos; allí se seca o se cuaja. Con este color se tiñe lo azul obscuro y resplandeciente, es color preciado" (SAHAGUN, Tomo III, 1969, p. 343).

La palabra "xiuhquilitl", significa "hierba de azul" o "hierba que produce azul" en náhuatl, y es una planta de añil de origen del nuevo continente, que fue utilizada desde la época prehispánica. En Centroamérica se le llaman popularmente Jiquilite que es una corrupción náhuatl de la palabra "Xiuhquilitl".

Sahagún menciona, en el capítulo XV del libro VIII, "De los atavíos de las señoras"; "Usaban también las mujeres teñir los cabellos con lodo prieto, o con una yerba verde que se llama xiuhquilitl, por hacer relucientes los cabellos, a manera de color morado "(SAHAGUN, tomo II, 1969, p. 314). El "lodo prieto" fue también seguramente el lodo de añil. La masa sólida de puro añil, efectivamente, tiene un color brillante y morado, y los modernos tintoreros observan el color morado reluciente de la masa para determinar el nivel de la pureza del añil.

A propósito de la tintura del cabello, D. Cordry anotó que en los años 1930 todavía se observaba a las indígenas de Tetelcingo de Morelos, México, teñir el cabello a verde con el zumo de una planta (*Euparium albicaule Schúlz*) (CORDRY, 1968, p.128). Tener "EL Cabello negro verdeado" ha sido también el sueño de las mujeres japonesas. Esta planta se le llaman Xicin en Yucatán, e lxhotz en Petén, Guatemala, aunque no se sabe a ciencia cierta que si contiene el añil, sí se ha utilizado en Honduras para teñir a verde los hilos y tejidos.

Hasta hace poco se creían que el añil fue introducido al nuevo continente por los españoles después de la conquista. Las descripciones antiguas, sin embargo, revelan

claramente, que el añil y el lodo del mismo, aunque elaborados de otra manera, ya existían en el nuevo continente desde la época prehispánica.

1.3 El Añil de Centroamérica en la Epoca Colonial y Epoca Moderna

Aunque no se conoce la región exacta donde se comenzó el primer cultivo del añil por los españoles en Centroamérica, se considera que era en las tierras bajas de Guatemala, el Salvador y Nicaragua, ya que la temperatura ideal para el cultivo del añil es bastante alta. En todo caso, ya en 1575 (50 años después de la conquista) existían los campos cultivados de añil en toda Centroamérica (RUBIO SANCHEZ, 1976, pp. 32-33). La Real cédula del Rey Felipe II de España, estimuló y contribuyó grandemente a su comercialización, y el producto, en forma de añil índigo que era fácil de transportarse, se exportaba principalmente a España y a sus virreinos, o sea México y el Perú (Fig.1.1). Para su elaboración en los primeros años, los hombres tenían que meterse en los pilones (pilas con grifo) o pilas llamadas canoa para pisar las plantas y extraer de ellas la sustancia del añil, lo cual fue muy dañino para la salud de los trabajadores, tanto que prohibieron en 1600 el uso de los pilones. Del añil elaborado en los obrajes, se obtenían de varias calidades. 1) la primera llamada CORTE, que constituía la calidad más corriente. Tendía a ser opaca y no flotaba en el agua. 2) la intermedia, llamada SOBRESALIENTE, era menos compacta y al flotar, solamente salía del agua una mínima parte. 3) La denominada FLOR, era la calidad superior, famosa por su color "azul menos intenso", y podía reducirse a polvo fino fácilmente, sólo con frotarlo entre los dedos. A estas 3 clases se les puede agregar la denominada FLOR TIZATE, que era la calidad super mina y de la que menos se producía.

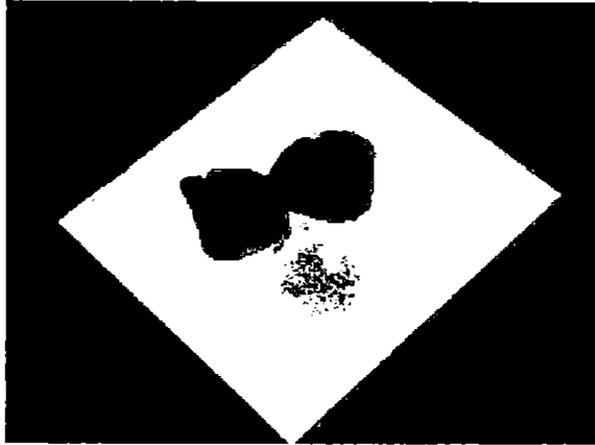


Figura 1.1 El Indigo de El Salvador

1.3.1 Siglo XVII

En Centroamérica donde no abundan recursos minerales, los conquistadores españoles tuvieron que iniciar con las industrias agropecuarias, entre los productos de exportación al principio de este siglo, el cacao ocupaba el primer lugar y el añil empezaba a cobrar fuerza.

Al producto del cultivo de añil que empezaba dar rentas considerables, se le gravaba con impuestos, uno de los primeros los constituyó el DIEZMO y otro fue la ALCABALA. Los obrajes se habían multiplicado considerablemente y para una mejor administración de la justicia se prohibió que los poseedores de obrajes pudieran ser elegidos para ocupar el cargo de alcaldes ordinarios. Por medio de las Reales Cédulas, no solamente se reglamentó el cultivo de añil en 1610, sino también daba hasta las instrucciones diminutas, un ejemplo de ellos, en 1619, se emitió la Real Cédula para dar instrucciones de cómo evitar los inconvenientes y daños causados por langostas, todo esto permite señalar cuánta importancia tenía el cultivo de añil para el Rey.

El cultivo del añil continuaba propagándose en todas las provincias del Reino. La Real Audiencia que en la segunda mitad del siglo XVI prohibió terminantemente que se usaran a indígenas en la industria añilera, continuó esta disposición, lo cual influyó grandemente para la adquisición de esclavos negros al principio del siglo XVII. Ya en los años 1620, según Fray Antonio Vásquez de Espinosa, existían más de 40 obrajes de tinta añil en el Corregimiento de Escuintepeque, 60 en el de Guazacapán y 200 en los términos de la ciudad de San Salvador (VASQUEZ DE ESPINOSA, 1948). Fray Antonio Vásquez describió el procedimiento usado en los obrajes de entonces, así: "Para hacer la tinta añil tienen unas pilas en los obrajes, a modo de lugares en los cuales echan 200, 300 ó 400 cargas de esta yerba o Xiquilite conforme son, y estando la pila llena de esta yerba o xiquilite que de ordinario está cerca de algún río, arroyo o asequia, la llenan de agua, al modo de lino o cáñamo, la tienen en remojo 24 horas algo más o menos conforme son las aguas gruesas o delgadas, y cuando les parece a los que lo benefician que está buena y tiene el punto a que a de menester quita el votique, que tiene la tal pila para que toda aquella agua, salga y caiga en otra pila más honda, que está junto al del remojo, donde hay una rueda y artificio de agua o fuerza de una cabalgadura que va batiendo aquella agua, que con el movimiento de la rueda levanta gran espuma amarilla con visos azules y cuando a los que la benefician les parece que tienen su punto y sazón, deshecha ya toda la espuma y que toma color, cesa la rueda de andar y dejan de batirla, para que no se pase de punto, sosiégase el agua, asentada la tinta abajo, destapan otro votique que tiene el pilón de la rueda, donde está la tinta, sale el agua y queda la tinta en el suelo del pilón a modo de lama, de donde la cogen y la echa en unos pedazos de lienzo crudo o melingue que llaman coladores, en donde la tienen hasta que ha escurrido el agua y luego hacen de ellas panes y los ponen en tablas al sol, para que cure y seque, y a los cuatro o seis días de sol, queda seca y buena de donde la echan en costales, surrones y cajones, y por no ser toda la tinta igual, es por no asertar a darle el punto, porque una se pasa de

él y otra no llega y de esta suerte es el beneficio de añil (Fig.1.2)“. (VASQUEZ DE ESPINOSA, Primera Parte, Libro V, 1948, p.219) .

Esta descripción, a pesar de que tiene algunas omisiones pequeñas, explica claramente el procedimiento de elaboración indiana del añil de aquel tiempo.



Figura 1.2 Pilas del siglo XVII, descubiertas en una excavación

Arqueológica en San Andrés, El Salvador

Unos años después de la conquista, se establecieron las rutas comerciales marítimas entre dos virreinos, México y el Perú, pasando, naturalmente, por los puertos de las provincias en las costas del Océano Pacífico. Por medio de estas rutas marítimas, las colonias españolas desarrollaron el comercio durante casi 200 años, aún con las repetidas prohibiciones y restricciones impuestas por España y las amenazas de ataques de piratas. Las acciones de los piratas, principalmente del inglés Francis Drake, obstaculizaban gravemente el comercio marítimo de los españoles durante toda la época colonial.

En el comercio entre provincias, las primeras mercancías exportadas de Centroamérica (Guatemala, Nicaragua y El Salvador) al Perú era brea, cacao y añil que gozaba especial reputación. Y los puertos de las provincias centroamericanas de entonces eran en Nicaragua: San Juan del Norte, Granada y **Realejo** ; en honduras: Caballos y Trujillo; en El Salvador: **Sonsonate** (actual **Acajutla**); en Guatemala: **Iztapa**, Bodegas de Golfo Dulce (1550, Lago de Izabal) y Santo Tomás de Castillo que se fundó en 1609 y se desplazó las del Puerto Caballos de Honduras (los puertos de letras gruesas están en las costas del Océano Pacífico) (RUBIO SANHEZ, 1976, p. 225).

En los primeros tiempos, el comercio entre las provincias fue libre, sin embargo desde 1604, España comenzó a imponer varias prohibiciones y restricciones severas a este intercambio comercial, algunos de ellos, por ejemplo, eran la prohibición de transportación de plata y oro del Perú a México y a puertos intermedios centroamericanos, restricción sobre el número de naves (sólo 3) que anualmente se dirigieran de un virreinato a otro, comerciando únicamente con frutos de la tierra; restricción sobre el tamaño de los barcos (de 300 a 400 toneladas), que no debían además, atracar en costas centroamericanas. Estas restricciones afectaron mucho al comercio del añil de Centroamérica, ya que lo tuvieron que transportar por tierra hasta el Puerto Caballos de Honduras en la costa del mar Caribe para su exportación (IBID., p.225) .

España, temeroso de que sus dominios en el nuevo continente acumularan riquezas y ante todo, en busca de su propio interés, repitió a imponer varias prohibiciones y restricciones al comercio entre los virreinos y provincias, las cuales afectaron cada vez más gravemente el comercio del añil. En 1609, 5 años después de las primeras restricciones, España volvió a imponer las otras esta vez reduciendo más el tamaño y el número de los barcos. Pero en la Real Cédula emitida en 1620, mitigaron parcialmente la restricción del comercio de añil para el Perú. Los principales artículos que Centroamérica

recibía del Perú eran; aceite, aceitunas, vino, almendras, aguardiente, alcaparras, vinagre, etc., y se traficaba de México al Perú preferencialmente con los artículos asiáticos traídos por los galeones y que tenían una gran demanda por su rareza y alta calidad.

El cacao había sido el principal artículo exportable de Centroamérica, pero por diversos motivos, entre los que se encontraba la competencia del cacao producido en Guayaquil, que resultaba más barato, fue perdiendo su importancia, hasta que a mediados del siglo XVII, el añil encabezó la lista de artículos exportables del área. Según una información que se encuentra sobre el monto de la exportación del añil de Centroamérica a España, se enviaron en 1631, 3,500 quintales (aproximadamente 161 toneladas). En cierto día de 1637, el padre Thomas Gage vio llegar a Granada un gran patacho de mulas (por menos 300, dice él) procedentes de San Salvador y de Comayagua cargadas de añil, grana y cueros, y al día siguiente vio llegar tres recuas procedentes de Guatemala, una de las cuales iba cargada de añil (GAGE, 1946, p.275). Sin duda la tinta llegada a la ciudad de Granada era para ser embarcada hacia Cartagena para luego ser enviada a España, o bien para ser transportada hacia la ciudad de Panamá por vía terrestre para luego ser enviada al Perú.

En estos tiempos al parecer, los integrantes de la Real Audiencia se preocupaban mucho por la protección de los indígenas. El uso de ellos en los cultivos de algodón, tabaco y caña de azúcar era permitido por las autoridades, pero en los obrajes de añil continuaba siendo prohibido. Y así en 1635, la Real Audiencia de Guatemala decidió aplicar las Reales Cédulas vigentes que para proteger a los indios de vejaciones y abusos prohibían que los españoles, negros y mulatos se establecieran en los pueblos de indios y ordenó al alcalde mayor de la provincia de San Salvador que expulsara de los pueblos de indígenas a los españoles, negros y mulatos que en ellos residían. Esta medida indujo a las 50 familias españolas a unirse para fundar el pueblo de San Vicente de Lorenzana, situada a

orillas del río Acaguapa, en un fértil valle donde se dio gran impulso al cultivo del añil (RUBIO SANCHEZ, 1976, p.44).

1.3.2 Siglo XVIII

Se inició el siglo XVIII, constituyendo el añil o jiquilite, el principal artículo agrícola en Centroamérica y los añileros habían sido la élite económica del Reino. A mediados de este siglo, el añil cultivado en Centroamérica se calculaba en unas 400,000 libras (aproximadamente 184 toneladas), a un precio de 6 reales la libra (IBID., p. 76). La mayoría de esta cosecha se debe haber exportado a España, Perú y México, a este último fue llevado por vía terrestre. La industria añilera en Centroamérica, por tener muy poca competencia que eran únicamente la Audiencia de Santo Domingo y la de Venezuela, llegó a una prosperidad tan plena que pudiera decir que "con sólo el añil se sostenía la economía de todo un país ". Aprovechando esta bonanza en cuánto que más producían tanto más vendían, comenzaron a aparecer las personas inescrupulosas. Ellos vendían tinta mala o mezclaban tierra al añil que gozaba hasta entonces la fama de tener la mejor calidad del mundo. Existe una solicitud en que se pidió a las autoridades que se emitiera penas severas a estos defraudadores, ya que aumentaban los reclamos de los compradores (IBID., p. 79).

En el año 1773 cuando el llamado terremoto de Santa Marta destruyó la ciudad capital de Gobierno General de Centroamérica : Antigua Guatemala, se calculó la cosecha de añil en dos millones de pesos de oro.

Durante el año 1782, se fundó el Real Montepío de Cosecheros de Añil, y en el siguiente año un añilero acaudalado se convirtió en marqués. Esta persona fue don Juan Fermín de Aycinena e Irigoyen, a quien el Rey de España confirió el título de Marqués de

Aycinena. Hablando de las personas que hicieron grandes fortunas con el negocio de añil, no debería olvidarse a Heinrich Schliemann (1822–90), el célebre arqueólogo y helenista alemán, quien gracias a su riqueza acumulada con el negocio de añil logró excavar las ruinas de Troya y Micenas, que hasta entonces sólo existían en las epopeyas de Homero y contribuyó a sacar a la luz de la ciencia la Civilización Egea. Parece que era muy lucrativo el negocio del añil. En esta época, se hicieron algunas invenciones para el procedimiento de elaboración del añil y se observaron las preocupaciones sobre la sanidad pública. Por ejemplo, José Mariano Mociño, un botánico mexicano, inventó la manera de cómo determinar el “punto”, la clave que decide la calidad del añil, usando los areómetros en las pilas y un padre cura del pueblo de Managua inventó un método para combatir una de las mayores dificultades, las moscas en los obrajes que crecían llegando hasta 4 leguas a la redonda, el cual consistió simplemente en construir hornos para quemar el gabazo del añil.

Durante este siglo en que llegó a su plena prosperidad la industria del añil, libraron dos prohibiciones impuestas al cultivo del mismo, primero, se autorizó el empleo de los indígenas en los obrajes añileros; segundo, se concedió el permiso para la producción de añil en las Filipinas (1780). Y poco tiempo después, España misma hizo experimentos en el cultivo de plantas indigóferas, pero no informaron de éxito alguno en la producción de añil.

Como dice el refrán, “el bien nunca viene solo”, el cultivo de añil en Centroamérica de este siglo fue atacado por 2 enormes plagas de langosta o chapulín, una en 1723 y otra en 1771, que causaron grandes daños a las sementeras. Como todavía no existían insecticidas en aquel entonces, las medidas que se tomaron para su exterminio eran muy primitivas y no tenían más remedios que sonar botes, quemar maleza, pegar con ramas verdes a las manchas o celebrar misas.

Debido a las nuevas restricciones impuestas en el año 1713 al comercio que se efectuaba entre provincias a través de los puertos de la costa del Pacífico, la exportación del añil para el Perú fue grandemente afectada, aunque la exportación para México siguió efectuándose por vía terrestre. Por esta restricción que permitía solamente 2 entradas en el puerto y por otras razones más, quedaban muy pocos puertos habilitados en la costa del Pacífico. En lugar de ellos, en la segunda mitad del siglo XVIII, hicieron en la costa del mar Caribe el puerto de Omoa, Honduras, dando el impulso a la industria del añil en las regiones aledañas al puerto.

En el año 1764, el Rey declaró el libre comercio entre el Perú, México, España, Guatemala y Nueva Granada. Y desde el siguiente año, la liberación comercial se fue extendiendo entre España y otros lugares de América. El monto aproximado de lo exportado durante la década de 1770 giró entre 10 a 15 mil quintales (460-700 toneladas) que es casi triple de lo exportado a mediados del mismo siglo (IBID., p. 297). En Europa a finales del siglo XVIII, España se vio obligado a elegir su aliado: o Francia de Napoleón o Inglaterra. Finalmente, el gobernador de España, Manuel Godoy, decidió aliarse con Francia y por consiguiente enemistarse con Inglaterra. A consecuencia de ello fue el estancamiento de su comercio por el mar Caribe, pues no pudiéndose efectuar ninguna operación mercantil, la exportación del añil también quedó estancada durante 1796 a 1799 (IBID., p. 142).

Tabla 1.1 Producción de Añil: 1791-1800

| Año | Producción (Ton) | Año | Producción (Ton) |
|------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| 1791 | 467 | 1796 | 398 |
| 1792 | 522 | 1797 | 352 |
| 1793 | 529 | 1798 | 345 |
| 1794 | 364 | 1799 | 288 |
| 1795 | 392 | 1800 | 369 |

1.3.3 Siglo XIX

Durante este siglo, empezó la decadencia de España, seguidamente, aconteció la independencia de las provincias de Centroamérica (1821), las cuales, tras la anexión y separación al imperio mexicano (18 meses desde el año 1823), se independizaron una tras otra, empezando por la independencia de Nicaragua de 1838. Al verificarse estos hechos trascendentales en la historia centroamericana, la industria del añil entró en la época de su decadencia.

Centroamérica ha tenido en su historia agrícola, cuatro cultivos principales : cacao, añil, grana y café, todos estos cultivos se debe en parte su decaimiento a la competencia de otros países. Así, el cultivo del cacao tuvo su competencia con el cultivado en la Audiencia de Quito, con su cacao de Guayaquil; la grana o cochinilla fueron las Islas Canarias las competidoras; las de café fueron los países de América del sur y en añil su principal competidor fue Inglaterra que comenzó a trabajar en este campo desde el principio del siglo XIX.

A partir del año 1817, tomando Inglaterra en consideración el buen mercado que existía en Londres y las grandes ganancias que sacaba España con el comercio de añil, empezó a llevar la semilla a la India para su cultivo (IBID., p. 178).

Desde el principio de este siglo, España se mantenía en las guerras que la llevaron a la acelerada decadencia. En 1808, cuando las tropas francesas de Napoleón invadieron España, los habitantes de los dominios españoles de Centroamérica donaron patrióticamente buena cantidad de tinta para la causa real (IBID., p. 174). Pero durante la década de 1810, cuando España iba perdiendo su fuerza en varios dominios españoles del nuevo continente, se empezó a notar el aire amenazador que luego se convirtió en

brotos subversivos contra las autoridades. En Centroamérica, estos lugares donde hubo brotes subversivos eran León (Nicaragua), Granada (Nicaragua), Chiquimula (Guatemala), Metapán (El Salvador) y San Salvador, siendo de notar que en ellos eran en donde el cultivo del añil se encontraba muy generalizado y por consiguiente los habitantes sufrían la opresión de España.

En 1847, se decretó la creación de la República de Guatemala y quedó completamente desintegrada la federación centroamericana. En esta etapa políticamente agitada, desapareció el montepío de cosecheros del añil y la industria añilera concedió su supremacía al cultivo de la grana. Ya para 1818, se había introducido con éxito el cultivo de la grana o cochinilla en la provincia de Guatemala y como en su proceso no se necesitaba grandes terrenos ni gran número de trabajadores, o sea era un cultivo familiar, había ido prosperando tanto que en 1847 llegó a ocupar el primer lugar de los artículos exportables del país. Pero aún esta supremacía de la cochinilla no duró tanto que, en 1871, se cedió al café.

La tendencia del abandono del cultivo de añil se observaba también en otros países de Centroamérica; Honduras traficaba como mineral, tabaco y ganado, y Costa Rica con café, pero en El Salvador y Nicaragua todo su giro comercial estaba todavía en el cultivo del añil.

Las tres preocupaciones primordiales de los añileros centroamericanos de esos tiempos habían sido la lluvia, la langosta o chapulín y los precios del añil. En 1804, una plaga de langosta apareció en la provincia de Nicaragua y llegó hasta las alcaldías de Verapaz de Guatemala, ocasionando grandes estragos al cultivo del añil. Además, debido a que los precios del añil de entonces eran muy inestables, la siembra del jiquilite y la producción

del añil fue considerada como una industria venida en decadencia, y los añileros empezaron a pensar sustituirla con el cultivo de grana o cochinilla.

El gobierno, con el fin de estimular la industria añilera que iba en decadencia, concedía varias gracias a los que se dedicaban a nuevos cultivos de añil, por ejemplo en 1808 exoneró a una persona de todo impuesto, por haber iniciado el cultivo del jiquilite en su hacienda, situada en San Juan Sacatepéquez en el altiplano de Guatemala y existe un documento en 1813, que señala que existían varios obrajes en las regiones frías, tales como Totonicapán, Huehuetenango y Santa Catalina (IBID., p. 177).

En Guatemala, con las agitaciones políticas del país, en 1871, el gobierno fue derrocado por la revolución de Miguel García Granados y Justo Rufino Barrios, constituyendo otra de las circunstancias por la cual el cultivo del añil declinó grandemente, ya que en dicha contienda se tuvieron que alistar a un gran número de hombres, muchos de los cuales se dedicaban o se hubieran dedicado al cultivo de este producto. Y fue apenas 300 quintales (14 t.) el monto de producción del año 1873 en los 3 departamentos principales productores de oriente : Chiquimula–170 quintales, Jutiapa – 40 quintales y Santa Rosa – 90 quintales (IBID., p 207).

1.3.3.1 Invención de los Tintes Sintéticos

Uno de los principales factores que causaron la decadencia definitiva o final de la industria del añil en los países centroamericanos, fue la aparición de "añil sintético", un tinte químico inventado en Alemania. Desde mediados del siglo XIX, por el adelanto en la ciencia de la química orgánica, se había comenzado a realizar varios experimentos en sintetizar el tinte o medicamento a través de análisis de los componentes efectivos que se hallan en las plantas naturales. El químico alemán Runge, logró separar del alquitrán de

hulla una sustancia llamada anilina, que era la misma que el extracto de la planta de añil. Este descubrimiento dio inicio a las nuevas industrias sintéticas en los países desarrollados de Europa, tales como Inglaterra, Francia y Alemania (MINAKAMI, 1976 p.70).

Después, el inglés A. W. Hoffmann también confirmó que en los componentes de alquitrán de hulla existen anilina, bencina y tolueno, y su ayudante, W. H. Perkin, al tratar de sintetizar la quinina que es un específico contra la malaria con anilina, inventó accidentalmente un compuesto químico de color morado que luego fue nombrado Mauve y fue el primer tinte sintético en la historia. Esto fue en julio de 1856.

Al mismo tiempo, avanzaba el estudio de síntesis del INDIGO, materia colorante del añil en 1880, el químico alemán Adolf von Baeyer perfeccionó el método de síntesis del mismo, el cual fue industrializado en 1897. Este invento de añil sintético puso fin a la industria añilera de Centroamérica.

Después del añil, en 1905, el color morado de los múrices fue también sintetizado en Alemania y dio un golpe duro a la tradición de teñir con múrices, que apenas sobrevivía en las costas del Pacífico de Centroamérica.

La mayor parte de los tintes sintéticos utilizados actualmente son elaborados con el alquitrán de hulla y de allí se derivó su nombre general: el tinte de alquitrán. Los principales componentes son de hidrocarburo aromático, o sea bencina, naphtalene y anthracene, y por medio del encadenamiento o la transposición de los mismos en diferentes formas, se componen un sin número de colorantes que son clasificados y utilizados de acuerdo a sus respectivas características (YANAGI & Kariya, 1975, pp. 17-18). Los más conocidos son el colorante directo, el ácido, el básico, el mordente, el

sulfúrico, el ácido mordente, el de tina, el reactivo, el azoic y el de tina soluble. Recientemente sin embargo, se está cuestionando mucho la influencia dañina que los sintéticos orgánicos dan al cuerpo humano y por ende se están reestimando los tintes naturales en su justo valor.

Por la aparición del añil sintético, desaparecieron los obrajes en Guatemala, excepto unos pocos que quedaron en la región oriental del país. Y también en El Salvador, su principal industria agrícola en 1880 ya no fue el añil sino el café. A los mayas de Guatemala, grandes consumidores del añil natural, al principio no les gustaron los hilos ni las telas teñidos del añil sintético, a pesar de que eran más baratos que los teñidos del añil natural y que su color y su consistencia eran casi igual al natural. Extrañados los comerciantes averiguaron la causa, que fue la falta de olor específico del añil natural. Los mayas, al no sentir el olor del añil en los hilos y las telas teñidos del nuevo tinte, los consideraron falsos o imitación. El tinte fue aceptado finalmente cuando la Compañía Hoechst de Alemania, sin perder tiempo confeccionó el índigo-éter, el olor artificial del añil, y lo agregó a los hilos y las telas teñidos del añil sintético.

1.3.4 Siglo XX

Al iniciarse el siglo XX, se puede decir que el cultivo del añil en Guatemala, Honduras y Nicaragua, pertenecía a la historia. De El Salvador se enviaban algunas partidas pequeñas de añil a varios países. En El Salvador, el cultivo proseguía, así en 1940 en un documento oficial se decía: "Se cosecha de Noviembre a Diciembre el jiquilite, que produce el añil. En este año se cultivaron 518 hectáreas que produjeron 2,003 quintales de añil. De éstas se exportaron 364 quintales el resto de la producción quedó en el país para su consumo " (RUBIO SÁNCHEZ, 1976, p. 211). El porcentaje de producción por departamento fue el siguiente: Cabañas – 57.52%, Chalatenango – 31.55 % , San Miguel

– 10.8% , Cuscatlán – 0.15%. Aún en 1945, se producían más de 500 quintales (23 t) de añil en Chalatenango y Cabañas (IBID., p. 214).

1.4 Plantas de Indigo

Sin el indigo el mundo no hubiese tenido un tinte azul hasta el siglo IX. Afortunadamente, el indigo era el colorante natural más ampliamente disponible que cualquier otro desde el momento en que pudo ser obtenido de especies de diferentes plantas encontradas en algunas partes del mundo. "Indican", es la fuente química, o "precursor", del tinte y esta presente en las hojas de todas las plantas de indigo, produce el mismo colorante indigo-azul después de procesarlo sin importar la planta de donde provenga. Cada especie tiene sus características distintivas propias y sus métodos de producción, pero la preparación química de sus ingredientes es común para todas. Sin importar el origen de la planta de indigo: el pastel de Woad (Isatis tinctoria L.) proveniente de una granja en Thuringian, una indigófera de India, Africa o Centro América, Polygonum tinctorium proveniente de una isla de Japón, o especies de cualquier otro género creciendo en aldeas en el lejano Este o en el Oeste de Africa, el azul resultante es indistinguible aún para los especialistas.

La razón es que, quizá confusamente, un género fué llamado indigofera – i.e. "indigo bearer" – por Carl Linnaeus (1701-78) cuando encontró la clasificación botánica moderna, y son estas especies dentro de éste género las que proveen la mayoría de tinte usado en el comercio entre continentes.

A habido una discrepancia considerable entre eruditos acerca de la difusión y domesticación de plantas de indigo. Existe evidencia del hecho de que la habilidad de colorear de las plantas de indigo fué descubierto independientemente por personas en diferentes continentes, aunque más tarde las especies de indigo y las técnicas de teñir

fueron intercambiadas deliberadamente entre países y continentes para propósitos comerciales; y la India fué quien hizo énfasis a ésta iniciativa. Investigaciones recientes hechas por paleobotánicos sugieren que la especie indigofera puede originalmente haberse expandido desde África a Arabia e India como mala hierba junto con el algodón y el cereal.

Ahora que las técnicas de análisis científico han llegado a ser más eficientes, el interés en el tema ha crecido, botánicos y químicos orgánicos han llevado a cabo una continua investigación de los tipos y propiedades de plantas de indigo.

Del literal (a) al (g) de ésta sección se listan algunas plantas de indigo de importancia.

a) Indigofera

El género *Indigofera*, el tercero más grande en la familia Leguminosae, consiste de casi 800 especies. Estas especies pueden crecer sobre la tierra entre el nivel del mar y 1650 mts. Alrededor de 600 pueden ser encontradas en África, cerca de 200 en Asia, 80 en América y entre 50 y 60 en Australia. Nadie puede explicar todavía porqué solo unas pocas de éstas tienen un alto contenido de Indican, precursor del indigo.

La especie más ampliamente explotada de todas las plantas de indigo es la especie *Indigofera tinctoria* L. (= *I. sumatrana*), un arbusto perenne el cual ha sido cultivado en la mayoría de las regiones tropicales y subtropicales. Se cree que se propagó junto con la tecnología de teñido, primero desde la India al Sur Este de Asia, luego del Medio Este a partes de África, incluyendo Madagascar, y posteriormente a América (debido al uso en estos lugares de palabras basadas en el lenguaje antiguo de la India, Sanskrit, en el cual el indigo era llamado *nil*). Bajo condiciones favorables, la *I. tinctoria* puede crecer hasta 2

mts. Se distingue de otras especies de indigo por sus hojas grandes y largas, es relativamente delgada, con vainas en forma de arco o rectas.

Las otras indigoferas importantes utilizadas para teñir son la Africana I. arrecta, la I. articulata e I. coerulea. Estas a menudo poseen un mayor número de hojas y follajes más pequeños que la I. tinctoria y diferentes formas de vainas. La I. arrecta, propagada en Africa, fué introducida en Java a mediados del siglo IX, donde fué llamada indigo "Natal". Fué posteriormente cultivada en India, donde se conoció con el nombre de indigo de "Java". También creció en algunas partes de Indonesia (Sumatra, Sumba y Flores), y en Vietnam, Laos, Las Filipinas y el Cercano Este. Tenía hojas más largas que la I. tinctoria y fué considerada la mejor variedad de indigofera. La I. articulata y la I. coerulea, ambas a menudo referidas como I. argentea L., fueron cultivadas en el Noroeste de la India, en Arabia y el Oeste de Africa, se adaptan más a climas secos que la I. tinctoria. En los años de oro de la producción textil Islámica, las indigoferas también fueron cultivadas en las Islas del Mediterráneo de Malta, Sicilia y Chipre, así como en España.

Los otros indigos de mayor comercialización fueron las especies nativas de América tropical, I. suffruticosa Mill., (= I. anil L.) e I. micheliana Rose (= I. guatemalensis Moc.), algunas veces erróneamente considerada una sub especie de la I. suffruticosa. La primera fué también cultivada en Norte América, introducida por los Holandeses al Sudeste de Asia y adoptada en China y Africa. Como sucedió con las especies Asiáticas, la difusión de especies Americanas ha sido el centro de atención de muchos estudios botánicos, así como ha habido confusiones considerables acerca de las especies usadas en el comercio. Esto hace pensar que las especies dispersas desde el Oeste de México al resto de Centro y Sur América en ambos periodos pre y post Hispánicos y que la I. suffruticosa y la I. micheliana son especies nativas, mientras que la I. tinctoria fué

introducida después de la conquista. La I. caroliniana Mill, una especie nativa de Norte América, fué también utilizada comercialmente en el estado del sur de Norte América.

Concentrar el tinte en un estado duradero tiene obviamente implicaciones para el comercio. Muchas de las otras plantas de indigo han sido tradicionalmente convertidas en una pasta húmeda u hojas para compostaje, útil para el comercio a cortas distancias y más fácil de usar, pero impráctico para el comercio intercontinental. De estas plantas, las dos más importantes fueron la Isatis tinctoria L. y Polygonum tinctorium (=Persicaria tinctoria), la principal fuente en China y Japón. Otras plantas de indigo de importancia incluyen Lonchocarpus cyanescens; Strobilanthes flaccidifolius (=Baphicacanthus cusia; =Strobilanthes cusia), Marsdenia tinctoria (=Asclepias tinctoria), y Wrightia tinctoria (=Nerium tinctorium).

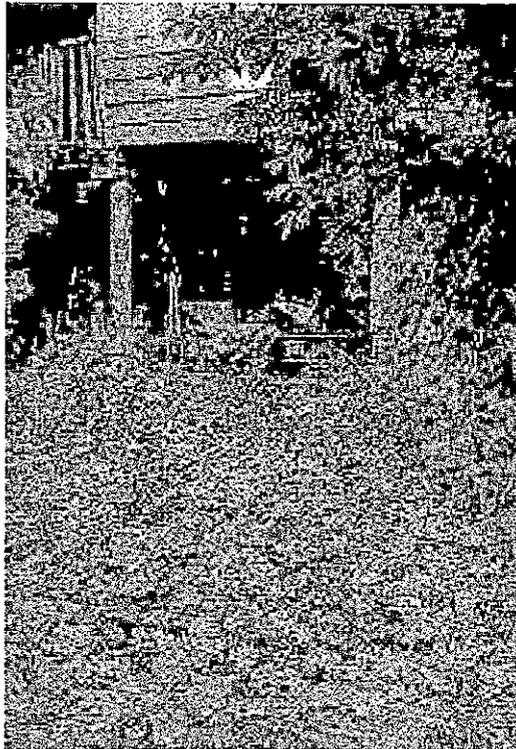


Figura 1.3 Indigofera tinctoria cultivada en Ba Saang Sa, cerca de Nong Khai, nordeste de Tailandia, 1991.

b) Isatis tinctoria

Isatis tinctoria, o woad (a menudo conocida por su nombre en Francés, *pastel*), es una de alrededor de 50 especies pertenecientes al género *Isatis*. Es un miembro bianual de la familia Cruciferae. Nativa del Mediterráneo y el Oeste de Asia, no se sabe cuando se expandió al Noreste de Europa, aunque fué encontrada en Gran Bretaña en la Edad de Hierro y en el Norte de Escandinavia. El pastel de woad también creció en los Azores y fué llevada a Norte América por los colonos. En el primer año, la planta parece una escarapela de hojas de espinaca. En el verano del segundo año, cuando florece alrededor de 1 mt., las hojas en forma de flecha abarcan el tallo, y hay una masa de pequeñas flores amarillas en la punta de las ramas.

Aunque la principal especie que ha sido explotada comercialmente es la Isatis tinctoria, se ha encontrado que muchas otras variedades y especies contiene algo de materia colorante. Una de éstas fué reportada que crece en España y Portugal, mientras que Botánicos Turqueses han identificado alrededor de 36 especies y sub especies, algunas de las cuales han sido usadas hoy en día para teñir de manera natural tapetes. Investigaciones recientes han revelado que algunas especies Turcas de Woad contienen mayormente *indirubin*, el "indigo rojo", componente normalmente presente sólo en pequeñas proporciones en plantas de indigo.

En China una especie de Woad más avanzada, Isatis indigotica (conocida localmente como *sun glan* o *tien-ching*, y en inglés como "tea indigo" o "cabbage blue"), fué identificada por el botánico Robert Fortune en 1840. Esta especie, la cual parece tener un mayor contenido de tinte que otras especies de Woad, probablemente fué introducida en el siglo XVI para usarse en áreas bien frías para plantas de indigo tropicales y subtropicales. Fortune encontró que se cultivaban en abundancia alrededor de Nanking

para abastecer a los teñidores de Shanghai y otros pueblos del norte, mientras que en el siglo XVII fuentes Chinas mencionaron su cultivo sobre el lado de las colinas al sur de la provincia Fukien. Watt más tarde mencionó en su diccionario económico que el pastel de Woad, o "*devil's weed*", también se encontraba creciendo en forma silvestre y era cultivada en el Tibet y Afghanistan.

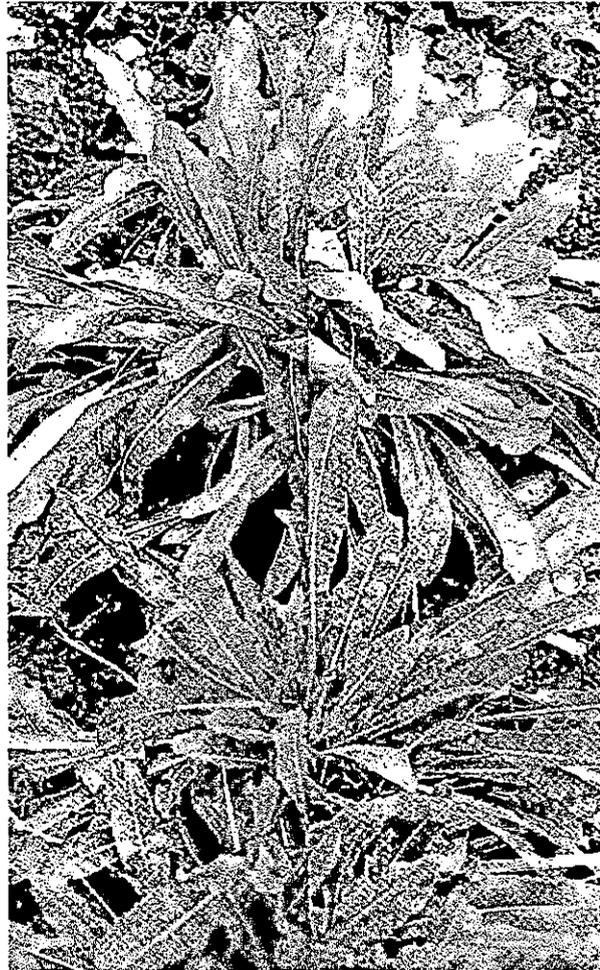


Figura 1.4 Isatis tinctoria, o Woad (pastel), primer año de la planta,
Devon, 1996.

d) Strobilanthes flaccidifolius

Un sub arbusto perenne de la familia Acanthaceae, Strobilanthes flaccidifolius, conocida como "Assam Indigo" (o localmente como *rum*), ha sido una fuente de indigo en las regiones montañosas de Asia, importante en el centro y suroeste de China, Tailandia, Burma, nordeste de India, Bhutan, Laos, Vietnam, Bangladesh y Mayala. Este es el único tinte natural todavía utilizado por personas de varios grupos étnicos minoritarios que viven en regiones remotas de esos países. También fué cultivada en Taiwan en el sur de las islas japonesas Ryukyu, particularmente en Okinawa, donde todavía puede encontrarse.

Las plantas S. flaccidifolius alcanzan 1 mt. de altura, tienen malva, flores en forma de trompeta cuando éstas florecen. El contenido de tinta es alto y la planta produce un matiz particularmente oscuro.

e) Lonchocarpus cyanescens

Una fuente de indigo ampliamente propagada en gran parte del Oeste de Africa, es la leguminosa nativa Lonchocarpus cyanescens, algunas veces conocida con "Yoruba Indigo" (ó *elu* en Yoruba). También fué introducida en Malasya. Es ésta una liana leñosa de rápido crecimiento, que alcanza alrededor de 3 mt. de altura, con hojas largas y penicolas de guisante como flores de matiz morado. Cuando se corta hacia abajo ésta vuelve a crecer pronto, y, como la indigofera, las plantas jóvenes producen el mejor tinte. Su tinte, así como el de la indigofera (probablemente introducida con el Islam) es conocido localmente como *gara*. A principios del siglo XIX el explorador Francés René Caillié observó que los teñidores utilizaban ambas plantas en la Costa Norte de Ivory y en Sierra Leona.



Figura 1.6 Lonchocarpus cyanescens creciendo en forma silvestre en Nigeria.

f) Marsdenia tinctoria

Otra exuberante parra, Marsdenia tinctoria (de la familia Asclepiadaceae), fué ampliamente utilizada en partes del sudeste de Asia, donde su nombre más común es *tarumakar*, como una fuente alternativa de indigo. La planta con sus hojas ovaladas oscuras y largas y racimos circulares de pequeñas flores amarillas fué encontrada en regiones extensas desde el nordeste de las Himalayas y Burma a las islas de Indonesia, y también fué cultivada en Deccan. Puede ser cosechada todo el año y crece en regiones tan húmedas como las indigoferas. Puede ser usada fresca para teñir, o tratada como las indigoferas para producir tinte para el comercio.

g) Wrightia tinctoria

Otra planta de Indigo significativa es Wrightia tinctoria (de la familia Apocynaceae), conocida por su nombre en Latín, *nerium*, “*dyer’s oleander*” o “*Manila Indigo*”. Un pequeño árbol de ramas finas, tenía hojas ovaladas estrechas con grandes secciones de flores blancas perfumadas y vainas de semillas con forma de péndulo. Crece en forma natural en el centro y el sur de India, Burma y Malaya. Fué utilizada por las personas de Deccan, donde fué conocida como “*Pala Indigo*”. En 1790 los Británicos exploraron su comercio potencial. El relato de Roxburgh de su uso en la India fué publicado en 1811. El proceso de extracción del tinte fué el mismo que para las indigoferas, excepto que se requería agua caliente (tal como para la extracción moderna del pastel de Woad).

1.4.1 Plantas de indigo “falsas”

En adición a lo anteriormente expuesto, se ha dicho que otras plantas producen indigo. De acuerdo a Watt, Tephrosia tinctoria y T. purpurea (Leguminosae) de India central, fueron utilizadas para teñido de indigo, así como otras especies encontradas en Egipto. Además, hay un extraño grupo de plantas que han tenido fama por producir además de indigo genuino, “*indigo falso*” (o “*pseudo*”). Entre estas está Mercurialis leiocarpa (Euphorbiaceae), la cual es encontrada en la India, China y Japón, donde es conocida como *yama ai*. Otras plantas dentro de este grupo incluyen Desmodium brachypodum, la cual fué utilizada para teñido inusual de ropa en las islas Salomón, Scabiosa succisa L.; y Baptisia tinctoria (= Sophora tinctoria L.), las cuales fueron conocidas como “*yellow wild indigo*”, “*false/bastard indigo*” o “*rattle-weed*” y aparentemente utilizadas ambas, para teñir amarillo y azul en América.

1.5 Usos del Indigo a través de la Historia

Los usos del Indigo, no están limitados al teñido de textiles o a pigmentos para pinturas. Es difícil distinguir la función práctica del indigo como una sustancia colorante de aquellas creencias acumuladas que éste incluye.

1.5.1 Usos Medicinales Directos del Indigo

Los farmacéuticos actuales no están dispuestos a explicar porqué los químicos presentes en el indigo y varios otros colorantes parecen tener algún efecto medicinal, pero aceptan que esto puede ser así. Aunque el indigo no está entre las más notables plantas medicinales del mundo, el hecho de que éste ha destacado en la medicina tradicional no es tan sorprendente cuando se examina su función en la naturaleza. Los constituyentes químicos no están presentes en ciertas plantas usadas para teñir para proveer a la humanidad con sustancias colorantes, pero pueden estar ahí para proteger a las plantas o a los insectos y repeler a los depredadores. En algunas plantas donde los colores de los pigmentos son obvios, es posible que el color por sí mismo atraiga insectos o pájaros con el propósito de polinización.

A través de la historia, la lista de achaques que se cree que el indigo cura es extensa, la mayoría están basadas en sus aparentes propiedades purgativas, antisépticas y astringentes, aunque también se dice que previene o cura las aflicciones nerviosas tales como la histeria, epilepsia y depresión. Todas las partes de la planta han sido utilizadas - hojas, pigmento, raíz y semillas. Han sido mezcladas en una forma extraña con toda clase de sustancias, incluyendo pelo de cabra, huevos blancos, aceite de ricino, grasa y pimienta, y su aplicación es externa, además puede ser utilizada vía oral. Tales usos

están registrados antes del siglo I D.C. en la India y en China así como en la antigua Grecia y Roma.

Dado el potencial químico aparente del indigo no es sorprendente que éste sea tóxico si se toma en cantidades excesivas, y recientes investigaciones científicas han confirmado la toxicidad de algunas especies de indigofera. Ciertamente trabajadores forzados en las plantaciones de indigo del Este y Oeste sufrieron efectos nocivos, debido al procesamiento de indigo. El uso del indigo vía oral está prohibido por ley en Saxony. Sin embargo, su jugo de hojas fué utilizado en China como un antídoto para el envenenamiento, y una fuente China, la cual lista muchos usos medicinales del indigo, incluye una recomendación: las mujeres deben tomar jugo de hoja de indigo después del parto, pero advierte que una sobredosis puede ser "claramente dañina".

Hasta hoy en día el uso de indigo para tratar quemaduras, mordeduras de insectos, culebras y animales, gusanos intestinales, fiebres y desórdenes estomacales, ha continuado, especialmente en el Lejano Este, la India y el Medio Este y en partes de África. Una fuente de la India también recomienda tratamientos de indigo específicamente para la rabia y el cólera, mientras que en Turquía un paciente fué sometido directamente a un tanque de fermentación de indigo como un remedio para la ictericia. En Centro y Sur América, donde las características medicinales del indigo fueron apreciadas por poblaciones indígenas, tales como los Aztecas antes de la conquista de los Españoles, un compendio de fuentes Mexicanas desde el siglo XVI al XX coincide que el indigo puede ser utilizado como una purga, y para calmar toda clase de desórdenes estomacales. Este puede también, como en la creencia China, controlar desórdenes nerviosos, particularmente la epilepsia, y los indios Guatemalenses aún bañan a sus animales domésticos con soluciones de indigo para controlar garrapatas y otros insectos.

En países del Sur de la Península de Arabia a finales de 1980, muchas mujeres en comunidades remotas todavía se ungen ellas mismas y a su prole con extracto de plantas de indigo silvestre o comercial. Los hombres, también, se aplicaron tratamientos de indigo, por ejemplo, para sanar una herida algunos la envolvían en un abrigo de indigo con cera de abejas y aceite; ésto era más efectivo que las lociones antisépticas modernas.

El indigo también fué utilizado como un antídoto para varias enfermedades transmitidas sexualmente por los Aztecas y otras personas de Centro América, la India, y el Este de Africa donde tales achaques fueron tratados con la raíz de Indigofera tinctoria. En China sus raíces y tallos fueron recomendados para problemas menstruales. Entre los Mexicanos, el extracto de indigo fué recomendado como un anticonceptivo o abortivo.

En Nigeria los caballos y los burros fueron tratados por problemas estomacales con una solución de indigo administrada vía nasal.

Investigaciones científicas recientes comienzan a dar crédito a muchas afirmaciones históricas de la eficacia medicinal del indigo. En China, donde la medicina de woad es prescrita rutinariamente para infecciones virales y bacteriales, nuevas pruebas sugieren que éste puede ser efectivo en el tratamiento de complicaciones pulmonares asociadas con fibrosis quística. En otras pruebas utilizando pigmentos e infusiones provenientes de todas las plantas de indigo, paperas, hepatitis, eczema, varicela y meningitis han sido tratadas exitosamente. Además, el indirubin, presente en distintas cantidades en plantas de indigo, puede ayudar a combatir ciertos cánceres (Jenny Balfour-Paul, "Indigo", 2000).

1.5.2 Tela Teñida con Indigo como Profiláctico

Las creencias de las propiedades del indigo como antiséptico y repelente se ha extendido al uso de telas teñidas con indigo como protección. Este es el caso en muchos países y puede en parte relacionarse al olor rezagado del amoníaco el cual emanan las telas recién teñidas con indigo, así como también al poder de curación del indigo y algunas veces a otras características asociadas con éste todavía en discusión.

Comunidades agrícolas en China, Japón y otras partes de Asia, generalmente sostuvieron que las telas teñidas con indigo, repelían culebras e insectos ocultos en cultivos de arroz.

El dramático turbante teñido con indigo también tenía su aspecto medicinal. Se pensaba que prevenía y aliviaba dolores de cabeza. Los dolores de cabeza se aliviaban también inhalando el humo de las raíces de indigoferas quemadas.

Las manchas azules en las manos y el rostro llegaron a ser un símbolo de identificación de tribus.

1.5.3 Cosméticos

Vinculado cercanamente con aplicaciones medicinales está el indigo como adorno del cuerpo, así como para cosméticos, tatuajes o para teñir el pelo de la cabeza y el facial.

En ciertas partes del mundo el indigo frecuentemente ha sido frotado sobre el cuerpo, por decoración, por razones medicinales o por una combinación de las dos, como en el tatuado. En América Central, por ejemplo, el indigo estaba entre los colores empleados por los Mayas y los Aztecas para embellecer el rostro y el cuerpo. Mientras que el negro

era utilizado ahí por los hombres solteros y el rojo por los guerreros, el azul era reservado para la clase sacerdotal y aquellos que serían crucificados. La práctica fué abolida por la iglesia después de la llegada de los españoles.

En muchas partes de Arabia tanto el hombre como la mujer han considerado al índigo como decorativo y bueno para el cutis. En la Fig.1.7 se muestra una mujer de la tribu Jiddat Harasis, usando una máscara teñida con índigo, como se mencionó anteriormente, el uso de ésta sobre la piel era considerado beneficioso para el cutis. También fué aplicado en diseños decorativos para el rostro, manos y pies, como la planta Henna, y de hecho fué algunas veces llamado "*henna black*" cuando las dos hierbas fueron combinadas para hacer un tinte también utilizado para el cabello.



Fig. 1.7 Mujer de la tribu Jiddat Harasis,
Oman, 1988.

1.5.4 Tatuajes

El indigo ha proveído una ideal sustancia para pintar tatuajes, dada su supuesta característica como antiséptico y tomando en cuenta el simbolismo del color azul. Los orígenes de los tatuajes y las cortaduras, los cuales abarcan todos los continentes, son oscuros, pero pueden radicar en una función primordialmente medicinal que data desde la pre-historia. Existe evidencia de tatuajes en la América pre-histórica y en Egipto, el cuerpo desembalsamado de una mujer quien vivió hace 5000 años mostró rastros de cortes superficiales, pintados en blanco y azul, sobre su abdomen. Aunque otras plantas con cualidades antisépticas fueron también utilizadas, el indigo era popular, particularmente en las áreas más pobres, como registró un viajero en Egipto a finales del siglo XIX, quien observó que las mujeres tenían tatuajes sobre sus manos, brazos, pies, escote, frente, barbilla y en los labios.

Tatuarse con indigo era común en otras partes de Arabia y también en África. Los diseños de los tatuajes tenían funciones específicas: algunos servían como medicina preventiva, mientras que otros eran talismánicos.

Por siglos el tatuarse fué también una práctica en el Este. El tatuado con indigo puede haberse practicado en el norte de Tailandia así como por un grupo minoritario del Sur de China, como un vestigio de una tradición mucho más antigua.

1.5.5 Cabello y Barbas

Una vez más el color y el brillo del indigo combinado con sus aparentes propiedades medicinales le ha dado una doble atracción. Un sacerdote en México en 1547 observó la costumbre entre mujeres indígenas de teñir su cabello con arcilla negra o indigo para

hacerlo brillar. El indigo todavía es usado con este propósito en partes de Africa y en el Sur de Asia.

A principios del siglo XI Al-Biruni observó que el indigo "*enmascara los defectos de la edad*" y "*otorga samat (belleza)*".

Hay un caso claro de confusión entre los roles del henna, el pastel de Woad y el indigo. El indigo y el henna eran de hecho a menudo combinados para hacerlos teñir el cabello algunas veces llamado simplemente "*henna*".

A principios del siglo XIX un viajero Europeo con destino a Persia observó que, a pesar de que el indigo fué importado de la India, éste fué ampliamente cultivado en el Sur de Persia para teñir tanto ropa como barbas.

La mezcla de indigo y henna también fué popular entre los Musulmanes de Punjab, y a finales de 1930 algunos lugares en la India cultivaron la planta sólomente para teñir y para tratamientos medicinales. En Pakistán también se cultivó indigo para teñir el cabello el cual fué utilizado localmente y exportado como "*black henna*" al Medio Este y a algunos otros sitios. Un producto fué encontrado sobre las repisas de una tienda India en un pequeño pueblo en Bélgica en 1997, etiquetado "*Black Vasma Henna*".

En la Fig.1.8 se muestran algunos productos basados en indigo. Black Vasma Henna es una mezcla de índigo y henna utilizada como tinte para el cabello (Vasma significa en Árábico hojas de índigo) y Anoop es un tónico para el cabello. También se muestra hojas de indigofera secas y pigmento de indigo.



**Fig. 1.8 Productos basados en Indigo,
producidos en Pakistan y la India.**

Según Ibn al-Baytar en el siglo XIII, la calvicie y las úlceras de la cabeza podían prevenirse con tratamientos con indigo. La caspa, piojos y la picazón del cuero cabelludo eran tratadas con ceniza proveniente de la planta quemada.

2.0 CONDICIONES ACTUALES DEL PROCESAMIENTO DE AÑIL EN EL SALVADOR

Durante muchos años el añil, en El Salvador, fué el cultivo que se constituyó como una fuente de trabajo e ingresos para el agricultor salvadoreño. Cayó drásticamente en el mercado debido al ingreso de un sustituto de carácter sintético, cuyo precio significó su desplazamiento en los mercados tanto nacionales como internacionales.

A un siglo de su apogeo y decadencia, y frente a la crisis de los cultivos tradicionales, el añil o jiquilite vuelve a ser considerado como una opción viable en el camino de la agro industrialización, como una opción de desarrollo económico.

Considerado un "patrimonio nacional y cultural", el añil comenzó su proceso de resurrección en 1996 y, a finales de 1999 nació el "Proyecto de Reactivación del Cultivo y Procesamiento del Añil en El Salvador", por el interés de un grupo interinstitucional constituido por Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Proyecto de Fomento a la Integración de la Producción Agropecuaria y Agroindustrial (GTZ), Asociación Salvadoreña de Procesadores de Productos No Tradicionales (AGRONATURA), Consejo Nacional para el Arte y la Cultura (CONCULTURA) y Agrícola Industrial Salvadoreña S.A. (AGRISAL), el cual busca contribuir al incremento de los ingresos de las familias rurales y al rescate de la cultura del añil en El Salvador. Tiene un enfoque de nación, y pretende ser sustentable, sostenible e incluyente, promoviendo la asociatividad de pequeños productores y su alianza con la gran empresa a través de su participación en la cadena de producción, procesamiento y comercialización del añil.

El listado de productores de añil del Proyecto Añil de El Salvador ("Grupo Añil") es el siguiente:

Tabla 2.1 Listado de Productores de Añil del Proyecto Añil de El Salvador

| EMPRESA | CONTACTO | CULTIVO | EXTRACCIÓN | TENIDO |
|---|---|---------|------------|--------|
| AGRISAL (Agrícola Industrial Salvadoreña) / Hacienda El Sauce | | X | X | |
| INDIGO TRADING SA de CV | Lourdes Mena | | | X |
| Hacienda Los Nacimientos | Rhina de Rehmann | X | X | X |
| Hacienda San Juan Buenavista | Grace Guirola | X | | |
| AGROINAGOR (Insumos Agrícolas Orgánicos) | Raúl Pineda | X | X | |
| Productores de Chalatenango | CORDES Chalatenango (Fundación para la Cooperación y el Desarrollo Comunal de El Salvador) Deisy Cierra Walter Peñate | X | X | |
| IIDPI (Instituto de Investigación para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas) y productores indígenas del país | Norma Romero | X | X | X |
| | Mario Marroquín Mejía | X | X | |
| ZEROB SA de CV (1) | Pedro Antonio Zelada | X | X | |
| | Rafael Argueta Franco | X | X | |
| Productores de Morazán (1) | Foro Agropecuario de Morazán Fernando Argueta | X | X | |
| Productores de Oriente (1) | Asociación de Añileros de Oriente Alvaro Henríquez | X | X | |
| ADIT (Asociación para el Desarrollo Integral de Tejutepeque) | | x | x | |

(1) Grupos u empresas que desarrollarán sus actividades en el invierno 2001

Fuente: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

2.1 Especies de Plantas de Añil Cultivadas en El Salvador

En El Salvador se reportan dos variedades de plantas de añil:

1. Indigofera guatemalensis Moc.
2. Indigofera suffruticosa Mill.

Estas especies se clasifican así:

Tabla 2.2 Clasificación Botánica de las Plantas de Añil Cultivadas en El Salvador

| | |
|---------------|--|
| División/ | Antofitas |
| Sub-división/ | Dicotiledóneas |
| Clase/ | Arquiclamideas |
| Familia/ | Leguminosa |
| Sub-familia/ | Papilionáceas |
| Género/ | Índigófera |
| Especies/ | I. guatemalensis Moc. I. suffruticosa Mill. |

Los caracteres botánicos son: receptáculo muy corto, cáliz gamosépalo de lóbulos casi iguales, pétalos sentados, alas de la corola papilionáceas, pétalos asentados al androceo, corona erecta, obtusa, acuminada, provista de un casco saliente; diez estambres diadelfos, anteras uniformes, velludas; ovarios sentados con muchos óvulos, estilo glabro; estigma captado en forma de pincel. El fruto es una vaina pequeña, cilíndrica, tetrágona, un poco comprimida y ya seca, un poco arqueada, con cinco a siete semillitas oscuras, ovoideas.

La Índigofera suffruticosa Mill. fué la planta más popular en el nuevo continente, con la cual se producía el colorante de añil en la época prehispánica. En un tiempo se le llamaba también I. anil L. o I. Guatimala Lunan y sus nombres comunes son Jiquilite, Añil de piedra (Petén), Barbasco (Huehuetenango), Platanillo o Ch'oh (Yucatán). Jiquilite es una palabra nahuatl: Xihuitl= el color azul o verde; Quilitl= hierba, en conjunto significa la hierba que produce el color azul o verde. El cultivo de I. suffruticosa Mill., se extendió por todo El Salvador especialmente en la zona norte.

A la Indigofera guatemalensis Moc. también se le llama jiquilite. Se caracteriza por crecer en lugares relativamente altos. No se sabe si es cierto de que su origen sea Centroamérica. En El Salvador se cultivaba ampliamente, pero el cultivo de esta especie no duró tan largo tiempo como el de I. suffruticosa Mill.

2.2 Manejo Agronómico del Añil en El Salvador

Uno de los aspectos más importantes que está íntimamente ligado con un buen rendimiento en el proceso de extracción del añil, es la parte agronómica, pues según expertos los resultados que se tengan en la extracción del colorante, básicamente dependen del cuidado y manejo adecuado que se le haya dado al cultivo, es decir a la planta durante todo su periodo de siembra, crecimiento, maduración y época de cosecha. Pues el tamaño que la hoja de la planta alcance depende en gran medida de un buen sistema de siembra y cuidado durante todo el ciclo vegetativo que ésta tiene.

A continuación se presenta el manejo agronómico que se está dando a la planta de añil, en algunos de los obrajes existentes en el país.

Tabla 2.3 Manejo Agronómico de la Planta de Añil en El Salvador

| OBRAJE | AGRISAL/EL SAUCE, S.A. DE C.V. | AGRO-INAGOR S.A. DE C.V. |
|--|--|--|
| UBICACIÓN GEOGRÁFICA | Santa Ana | El Paisnal |
| DESCRIPCIÓN ECOSIFISIOGRÁFICA | La manzana de terreno sembrada se hizo en un terreno plano, pedregoso y de muy poca fertilidad, con presencia de arcillas pesadas, arena volcánica, talpetate y una precipitación pluvial de 2,000 a 2,300 mm de lluvia. | Ha sido sembrado en terrenos con pendiente fuerte, moderada y plana, suelos de textura arcillosa, franco arenoso, poco fértiles, con una precipitación anual de 2,600 mm. Los métodos de siembra utilizados son en asocio con maíz, cucurbitáceas y como monocultivo. |
| OBTENCIÓN DE SEMILLA | Fue proporcionada por Don Lorenzo Amya, através de su gestión en CONCULTURA, de la variedad Indigofera guatemalensis Moc. y unos pocos granos de Indigofera suffruticosa Mill. También se obtuvo semilla de una plantación, ésta fué cortada en rama, puesta a secar sobre una lona y luego aporreada. | Fue lograda a partir de algunos arbustos silvestres localizados en la zona del Paisnal. Además, se ha destinado 1 manzana de terreno, para que después del periodo de cosecha cuando la planta produce un nuevo brote, éste sea aprovechado para la obtención de semilla. |
| PREPARACIÓN DEL SUELO | Únicamente se le dió una peña negra, no se aplicó herbicida. | * Terrenos con pendiente: limpieza, siembra con chuzo o azadón en plazuelas, mulliendo el suelo para depositar luego la semilla. * Terrenos planos: uso de maquinaria, la cual consiste en 1 paso de arado y 2 pasos de rastra y luego el surqueado con una yunta de bueyes. |
| SISTEMA DE SIEMBRA | Se hicieron pequeñas parcelas a chorro seguido, al voleo y en posturas. Los distanciamientos entre surcos fueron de 80 cm. y entre posturas de 20 a 30 cm. La época de siembra fué en Mayo. | Terrenos planos: método a chorro seguido, con distanciamientos de 1.5 m y 1 m entre surco. Por postura los distanciamientos utilizados han sido 1 m entre surco y 40 cm entre planta. Transplante en pilón: 1 m entre surco y 0.4 m entre planta. La época de siembra es al inicio de la época lluviosa (10-15 Mayo) |
| PROBLEMAS DE MALEZAS, FITOPATOLÓGICOS O ENTOMOLÓGICOS | No hubo problemas de importancia. | No se ha tenido un problema grave hasta la fecha. |
| COSECHA | La altura de corte se hizo entre 30 y 40 cm. del suelo, se hizo un solo corte en el año. En las áreas que se utilizaron para obtención de semilla, el corte fué realizado durante el mes de Diciembre y las otras áreas muestreadas se hicieron en Noviembre. | La época de cosecha se realiza entre el mes de Diciembre y Enero de cada año. Plantilla de primer corte: 1 corte en el año. Planta de rebrote (segundo año): 2 cortes al año, el primer corte en el mes de Julio, y el segundo en el mes de Octubre, capacidad de rebrote a los 3 meses. |
| RENDIMIENTOS | *** | 15,000 lbs. de material verde, equivalente a 7.5 tns/mz (hoja con ramas) |

Fuente: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), "Primer Encuentro Nacional para la Producción, Usos y Mercadeo de Añil en El Salvador" (17-18 de julio de 2000).

Actualmente, se carece de una metodología adecuada para la siembra de añil, y todo lo relacionado con el cultivo de la planta, está limitado a las experiencias que se tuvieron en el pasado, y a algunos estudios que en este campo se han hecho, en ningún momento se ha desarrollado un adecuamiento y actualización del cultivo. No obstante, a pesar de esto, se ha estado cultivando, y se han tenido diversidad de problemas, entre los que sobresalen los bajos rendimientos de producción y la mala calidad de la tinta, debido a que el tamaño de la hoja no es muy bueno y se sabe que éste puede afectar la calidad del colorante. Además, aunque no se han tenido problemas graves en cuanto a plagas y enfermedades que atacan el cultivo, entre los principales problemas de este tipo se encuentran: el gusano verde – folena Invernal *Opetophtera brumata*, gusanos peludos color amarillo *Stipnotla salicis* y gorgojos en la semilla; *Fusarium polvoriento*, podredumbre bacteriana, Mal del tallo y royas.

Por todo lo anterior, algunos productores se han visto en la necesidad de recibir capacitación y asistencia técnica en esta área, con el propósito de mejorar significativamente sus cultivos y con ello un mejoramiento sustancial en el proceso de extracción de la tinta.

2.3 Procesamiento del Añil en El Salvador

En El Salvador la obtención del añil o tinta a partir de hierba fresca de Jiquilite, está siendo explotada en forma artesanal, es decir utilizando el método tradicional de OBRAJES, el cual es una técnica que se utilizó en la época precolombina para la misma actividad y que fue modificada por los españoles durante el dominio colonial. Esta forma de procesar añil es considerada como parte de nuestra herencia ancestral, y en la actualidad ha sido retomada sin realizarle mayores modificaciones.

Los obrajes en donde se procesa el añil están constituidos por tres pilas colindantes e interconectadas: pila de prensado, pila de batido y pileta, en donde sus dimensiones varían de acuerdo a los requerimientos de cada productor.

A continuación se presenta la forma de procesar el añil en dos de los obrajes de nuestro país.

Tabla 2.4 Procesamiento de Añil en El Salvador

| OBRAJE | AGRISAL/EL SAUCE, S.A. DE C.V. | AGRO-INAGOR S.A. DE C.V. |
|---------------------------|---|--|
| TIPO DE OBRAJE | Es un obraje inicial, de 1.5 m ³ por pila, la capacidad es para unas 400 lb. de material verde (rama y hojas), su construcción es de piedra, cascajo, arena, cal y cemento. | El tipo de obraje con el que se cuenta tiene una capacidad de 2 tns. |
| MATERIAL UTILIZADO | Hoja seca, puntas verdes y frescas, se utiliza rama entera y se trata de cortar antes de la floración o al inicio de éste. | Hoja con tallo. |
| AGUA UTILIZADA | Agua de nacimiento, clara, sin residuos arcillosos visibles. | Agua de nacimiento, captada por cajas, llega al obraje por gravedad a través de tuberías. |
| ETAPAS DEL PROCESO | <ul style="list-style-type: none"> * <i>Prensado o remojo</i>: se prensa uniformemente en toda la pila, luego se pone una zaranda de metal de ¼ de pulgada, encima tablas, troncos y piedras. * <i>Batido</i>: con paletas, por un periodo hasta de 7 horas. * <i>Sedimentación</i>: Se deja sedimentar hasta 24 horas. * <i>Tendales</i>: se usa mantas de algodón conocidas como mantas colochas y gruesas. * <i>Cocinado</i>: antes y después de los tendales, por un periodo igual, hasta llegar al punto previo a la ebullición. * <i>Secado</i>: directamente al sol, sobre tablas de madera y en un secador solar de madera. | <ul style="list-style-type: none"> * <i>Prensado o remojo</i>: el material verde permanece de 15 a 20 hrs. en maceración. * <i>Batido</i>: con bomba achicadora durante 1 hora. * <i>Sedimentación</i>: Se deja sedimentar durante 24 horas. * <i>Tendales</i>: filtrado con manta corriente (tela), permaneciendo 2 días durante este proceso. * <i>Cocinado</i>: con leña en peroles aproximadamente por 45 minutos, en constante movimiento con paletas de madera. * <i>Secado</i>: al sol en bandejas de madera, permaneciendo aproximadamente 2 días. |
| RENDIMIENTOS | 150 lb. de hoja seca dan 1 lb. de añil. 350 lb. de material verde dan 1 lb. 4 – 10 oz. de añil | De 4 a 5 Kg. Por tonelada de material verde, con un 43% de indigotina. |
| MANEJO DE DESECHOS | <ul style="list-style-type: none"> * <i>Aguas residuales</i>: ningún tratamiento, se agregan a volúmenes mucho mayores en una zacatera de corte. * <i>Desechos sólidos</i>: secados directamente al sol, en tendidos malos. | <ul style="list-style-type: none"> * <i>Aguas residuales</i>: descargadas al resumidero del obraje. * <i>Desechos sólidos</i>: utilizados en la producción de abono orgánico. |

Fuente: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), "Primer Encuentro Nacional para la Producción, Usos y Mercadeo de Añil en El Salvador" (17-18 de julio de 2000).

Actualmente, dado que la extracción del colorante de la planta de añil esta siendo llevada a cabo mediante obras con algunas pequeñas modificaciones, se presentan varios inconvenientes durante el proceso, entre los más relevantes se encuentran:

- Se desconoce el tiempo exacto que debe durar el proceso de fermentación y el de oxigenación.
- En la etapa de sedimentación, se pierde colorante, debido a que la forma de la pila utilizada no es la apropiada.
- El filtrado se lleva a cabo en mantas, el cual no es un método adecuado, ya que se pierde una buena cantidad del colorante extraído porque éste queda retenido en las mantas.
- Para secar el colorante, debido a la mala filtración, deben cocinarlo primero y luego secarlo directamente al sol, lo que conlleva a un período de tiempo de secado bastante considerable.
- Se desconocen de las aguas residuales del proceso los parámetros fisicoquímicos, y en algunos casos dichas aguas estan siendo vertidas sin tratamiento previo alguno.

2.4 Mercado Mundial del Añil y Comercialización

En la actualidad, el uso del añil está destinado principalmente para teñir textiles, entre ellos:

- Ropa de cama
- Vestuario, ropa para niños (Diseños moda convencional)
- Ropa artesanal
- Bolsos y accesorios para uso personal

También se está utilizando en alimentos, cosméticos, medicamentos, pintura para murales, pinturas para niños, entre otros. Es de mencionar que todas estas aplicaciones se están dando en el extranjero, no así en nuestro país, en donde únicamente industrias como I.U.S.A. (Industrias Unidas S.A.) y Sherwin Williams están haciendo pruebas de cómo aplicar el añil en sus procesos industriales.

A pesar de que el añil que se produce en nuestro país es de muy buena calidad, hasta hace muy poco tiempo no se tenía una política de comercialización definida, ya que la poca producción que se obtenía y el querer comercializar el producto de forma individual por parte de los productores hacía aún más difícil competir en el exterior, en donde el mercado del añil es dominado por países como India y Japón que son los líderes a nivel mundial y los principales productores de añil en el mundo. Sin embargo, AGRONATURA (Asociación Salvadoreña de Procesadores de Productos No Tradicionales) ha estado ayudando a productores y pequeños agricultores dedicados al cultivo y procesamiento de añil a incursionar en el mercado exterior y gracias a ello están vendiendo su producto a Alemania y Suiza.

En este sentido, el Proyecto de Reactivación del Añil, con el fin de contribuir a solventar esta problemática tiene entre sus objetivos, promover la asociatividad de pequeños productores y su alianza con la gran empresa a través de su participación en la cadena de producción, procesamiento y comercialización del añil.

Entre los primeros resultados que los productores de añil han obtenido, luego de constituirse como bloque comercializador del producto, están los siguientes:

1. Se han identificado mercados potenciales para el añil, entre los cuales se encuentra el Mercado Europeo, cuya demanda estimada es de 2000 Kg/año. De ésta se tienen pedidos en firme de 800-1000 Kg.

2. Se ha logrado asistir a los siguientes eventos relacionados con el mercadeo y comercialización de añil y productos afines:
 - Participación en la Feria Internacional de Productos Orgánicos BIOFACH en Alemania.
 - Participación en la Feria de Productos Naturales de California, U.S.A.
 - Participación en la Feria de Productos Naturales de Baltimore, U.S.A..

3. Se ha elaborado un brochure de presentación del añil de El Salvador, además, de estar dando seguimiento a los contactos establecidos durante las ferias.

2.4.1 Requerimientos del Mercado Extranjero

Los requerimientos demandados por el mercado extranjero son los siguientes:

- a) Contenido de indigotina
- b) Pureza
- c) Homogeneidad del Producto
- d) Cumplimiento
- e) Precio

a) En cuanto al contenido de Indigotina el límite superior es del 60%, aunque en un producto de alta calidad el contenido mas frecuente es del 50%.

b) La pureza por tratarse de un producto natural en el caso del añil salvadoreño, las exigencias son más estrictas.

c) En relación a la Homogeneidad del Producto, el mercado es bastante flexible, pues aceptan que éste puede variar, ya que se sabe que es obtenido de varias fuentes de producción.

d) Referente al cumplimiento, el mercado requiere constancia en el abastecimiento, esto es muy difícil de cumplir en las condiciones actuales y es lo que más preocupa, pues la capacidad actual de exportación es apenas de 50 kilos, unas 113 libras de polvo concentrado de añil, lo que de seguir así, dejaría una demanda insatisfecha en el mercado. Se tienen expectativas de llegar a exportar un mínimo de 1130 lbs., equivalente a 500 kilos, la demanda es amplia, pero la oferta sigue siendo poca.

e) Los precios de venta del añil están relacionados directamente con la calidad del producto (contenido de indigotina), y se han logrado negociar en los siguientes términos:

Tabla 2.5 Precios de Venta del Añil en el Mercado Europeo

| Contenido de Indigotina (%) | Precio (US\$/Kg) |
|-----------------------------|---|
| 20 | 15.00 |
| 40 | 18.50 (sin moler) 20.50-23.50 (molido) |
| 50 | 25.00-30.00 (molido) |
| 60 | 41.00 |

Fuente: Asociación Salvadoreña de Procesadores de Productos No Tradicionales (AGRONATURA)

En cantidades pequeñas se estima que se pueden negociar precios entre el 30 y el 40% superiores al precio base de 20 US\$ /Kg.

La certificación orgánica mejora el posicionamiento del producto, pero no es un requisito ineludible para los demandantes encontrados. También se han establecido incentivos, por ejemplo premio del 10% si el producto no ha sido tratado con herbicidas ni contiene metales pesados.

El mayor país Productor-Exportador de añil es la India, el cual está muy bien posicionado en el mercado, con una producción consolidada y costos más bajos de producción y transporte. Además, utiliza un método de producción semi-artesanal muy diferente al nuestro.

Para poder competir con este gran productor, se pretende, estabilizar la oferta, reducir la variabilidad del producto y mejorar la producción artesanal existente, al mismo tiempo que se han establecido aspectos críticos para competir en el mercado, tales como ofrecer un producto de mayor calidad, con un buen precio y con mayor confiabilidad.

3.0 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE LA EXTRACCIÓN DEL COLORANTE DE LA PLANTA DE AÑIL

Para llevar a cabo la Optimización de la Extracción del Colorante de la Planta de Añil se requiere de la evaluación de diversos factores que puedan intervenir en dicha extracción, lo que implica un gran número de ensayos, por lo tanto, el Desarrollo Experimental de éste trabajo se realizará en dos partes:

Primera Parte: Desarrollo Experimental Pre-liminar

Etapa 1: Cribado de Variables

A través de un Diseño Factorial Fraccionario de Dos Niveles 2^{k-p} (Ver Anexo A), se determinarán los factores que, de una larga lista de candidatos, pueden tener una influencia significativa en el proceso.

Etapa 2: Establecimiento de los Niveles de los Factores más Significativos que permitan iniciar la Etapa de Optimización.

Segunda Parte: Desarrollo del Proceso de Optimización

Una vez identificados en la parte anterior los factores con influencia significativa sobre el proceso de extracción, el objetivo será la búsqueda de los niveles de éstos factores que optimizan la extracción.

3.1 Descripción de la Variable Respuesta

El componente principal del índigo natural es la indigotina, de la cual contienen del 70% al 90% las mejores clases, del 40 al 50% las medianas y un 20% las inferiores. Los componentes restantes son el rojo de indigo (indirrubina), el pardo de indigo, cola de indigo, agua y cenizas que consisten principalmente en carbonatos de calcio y de magnesio, alúmina y óxido de hierro. Por lo tanto, la variable respuesta a registrar será el contenido de Indigotina del añil extraído, ya que la buena calidad de un índigo depende exclusivamente de ésta variable.

El indigo se encuentra en las plantas en forma de Indicán $C_{14}H_{17}O_6N + 2H_2O$ descubierto en 1855 por E. Schunck. Es éste un glucósido del indóxilo que por hidrólisis (por fermentación o con ácidos) se descompone en glucosa e indoxil. Este último se oxida al aire inmediatamente, y queda transformado en Indigotina:

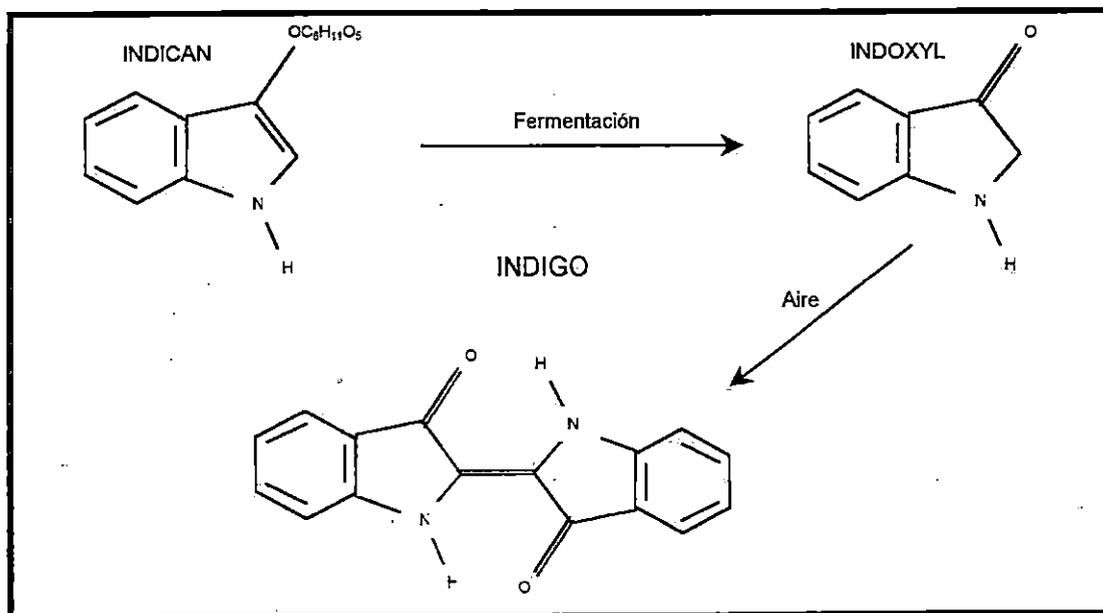


Fig. 3.1 Proceso de Transformación del Indicán a Indigo

(Esquivel, 1983)

3.1.1 Determinación del Contenido de Indigotina

Para llevar a cabo la determinación del contenido de Indigotina del añil extraído, se utilizará el Método Analítico elaborado por el Ing. Karl Grieder (Ver Anexo B). En dicho método, se utiliza Acido Sulfúrico concentrado (H_2SO_4), el cual además de ser un reactivo de alto costo, es altamente peligroso, puede causar irritación en los ojos, nariz y garganta, producir edema y problemas pulmonares; y como resultado de la descarga de las aguas residuales fuertemente ácidas en causas naturales, los suelos se ven afectados grandemente por alteraciones de su pH y se crean condiciones no apropiadas para el cultivo y otros usos. Además, investigaciones de dureza en aguas revelan que la cantidad de hierro, la conductividad y el nivel de sulfato aumentan considerablemente. Por todo lo anterior, se considera necesario reducir las cantidades a utilizar. Para ello, se aplicó al método una reducción a $\frac{1}{4}$, y se utilizaron técnicas estadísticas para su validación.

Como se especifica en el Anexo C; el modelo de análisis de datos para la validación que se utiliza es el de Pruebas y Estimaciones de las medias de poblaciones cuando σ no se conoce, estableciéndose que la hipótesis que se desea comprobar (hipótesis nula), es que: "no existe diferencia significativa entre el promedio obtenido de las réplicas del experimento con el valor especificado del contenido de indigotina que fué analizado en otro laboratorio". La hipótesis anterior trata de establecer que la variación en el porcentaje de indigotina con el método con una reducción a $\frac{1}{4}$ se debe exclusivamente al azar.

La validación del método reducido se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Las muestras a analizar provenían del Obraje El Sauce, las cuales estaban identificadas como: Muestra No. 1, 3 y 4, de las que ya se tenían registrados datos de contenido de indigotina (Ver Anexo D).
2. Se llevó a cabo la determinación del contenido de indigotina de dichas muestras, con el método con una reducción de ¼. Los resultados obtenidos fueron:

Tabla 3.1 Resultados Obtenidos en la Determinación del Contenido de Indigotina con el Método con una Reducción de ¼

| No. de Muestra | Absorbancia | Concentración (ppm) | % de Indigotina |
|----------------|-------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 0.23 | 3.4049 | 42.5613 |
| | 0.235 | 3.4858 | 43.5725 |
| | 0.235 | 3.4858 | 43.5725 |
| | 0.225 | 3.3241 | 41.5513 |
| | 0.23 | 3.4049 | 42.5613 |
| 3 | 0.19 | 2.7579 | 34.4738 |
| | 0.19 | 2.7579 | 34.4738 |
| | 0.185 | 2.6771 | 33.4638 |
| | 0.18 | 2.5962 | 32.4525 |
| | 0.18 | 2.5962 | 32.4525 |
| 4 | 0.14 | 1.9492 | 24.3650 |
| | 0.135 | 1.8683 | 23.3538 |
| | 0.14 | 1.9492 | 24.3650 |
| | 0.14 | 1.9492 | 24.3650 |
| | 0.14 | 1.9492 | 24.3650 |

Las absorbancias fueron leídas por medio de un espectrofotómetro (Spectronic 20), a una longitud de onda (λ) de 610 nm, para la cual se obtenía la máxima lectura.

La concentración (ppm) pudo determinarse, aplicando análisis de regresión a los valores obtenidos de absorbancia contra concentración (ppm) para el estándar al 98%. La ecuación obtenida para el modelo fué:

$$\text{abs} = 0.0195 + 0.0618214 * \text{concen}$$

en donde: abs = absorbancia

concen = concentración (ppm)

El coeficiente de correlación fué de 0.99877

El porcentaje de indigotina se obtuvo según la fórmula dada por el Dr. Grieder:

$$\%ind. = \frac{ppm * vol * f.d. * 100}{W_m * 10^6}$$

en donde: ppm = concentración de la muestra

vol. = volúmen de la solución de reserva

f.d. = factor de dilución

W_m = peso de la muestra

3. El procedimiento a seguir para realizar dicha prueba es:

1. Planteamiento de Hipótesis

Hipótesis nula, H_0 : “No existe diferencia estadística significativa entre el promedio obtenido de las replicas del experimento para la muestra con el valor especificado del contenido de indigotina que fué analizado en otro laboratorio”.

Hipótesis alternativa, H_1 : “Existe diferencia estadística significativa entre el promedio obtenido de las replicas del experimento para la muestra con el valor especificado del contenido de indigotina que fué analizado en otro laboratorio”.

La comprobación de la hipótesis nula planteada se realiza con un nivel de confianza del 95%, es decir, a un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

2. Estadístico de Prueba

$$t_o = \frac{(\bar{x} - \mu_0)}{s / \sqrt{n}}$$

donde: \bar{x} = promedio o media de los datos

μ_0 = valor especificado

s = desviación estándar

n = número de muestras

Tabla 3.2 Resultados de los Promedios, Desviaciones Estándar y Estadísticos de Prueba encontrados para cada Muestra

| No. de Muestra | Promedio $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ | Desviación Estándar $s = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) * \left(\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}\right)}$ | Estadístico de prueba $t_o = \frac{(\bar{x} - \mu_o)}{s/\sqrt{n}}$ |
|----------------|--|---|---|
| 1 | 42.7638 | 0.8456 | -0.0957 |
| 3 | 33.4633 | 1.0106 | 2.5739 |
| 4 | 24.1628 | 0.4522 | -1.1729 |

3. Criterio de Rechazo

$$|t_o| > t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$$

Para $\alpha = 0.05$, se evalúa $t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} = 2.776$ (Ver Anexo E)

Comparando para las muestras:

Los valores de los estadísticos obtenidos son menores que el del estadístico de tablas, no existe evidencia significativa al 95% de confianza como para que se rechaze la hipótesis nula.

4. Límites de Confianza

Los límites de confianza para μ son:

$$\bar{x} \pm t(n-1, \alpha) \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Para las Muestras:

Tabla 3.3 Límites de Confianza de μ para las Muestras Analizadas

| No. de Muestra | Límite de Confianza |
|----------------|----------------------|
| 1 | 42.7638 \pm 1.0498 |
| 3 | 33.4633 \pm 1.2546 |
| 4 | 24.1628 \pm 2.776 |

Según los resultados obtenidos no existe diferencia estadística significativa entre el promedio obtenido de las replicas del experimento para las muestras con el valor especificado del contenido de indigotina que fué analizado en otro laboratorio, por lo tanto, se acepta la validación del método para la Determinación del Contenido de Indigotina con reducción a $\frac{1}{4}$ con un nivel de confianza del 95%.

3.2 Desarrollo Experimental Pre-liminar

3.2.1 Etapa 1: Cribado de Variables

3.2.1.1 Elección de Posibles Factores que Afectan el Proceso de Extracción

En la Tabla 3.4 se presentan los posibles factores que pueden afectar el proceso de extracción del colorante de la planta de añil.

Tabla 3.4 Posibles Factores que Afectan el Proceso de Extracción

| FACTOR | DEFINICION |
|------------------------|--|
| Masa de agua | Volumen de agua a utilizar en la fermentación en relación al peso de hoja |
| Temperatura | Medida de la energía térmica alcanzada por las moléculas en solución, es decir, temperatura que se deberá mantener en el proceso de fermentación |
| Tipo de agua | Calidad de agua a utilizar en la fermentación |
| Tiempo | Duración total en horas, tanto de la etapa fermentativa como oxidativa |
| Agente de Fermentación | Porcentaje de Caña de azúcar triturada en relación al peso de hoja utilizada en la fermentación |
| Flujo de aire | Forma de introducir el oxígeno en la etapa oxidativa |
| Peróxido | Porcentaje de peróxido utilizado en la etapa oxidativa en relación a la cantidad de agua utilizada en la fermentación |
| Hoja | Material vegetativo utilizado como materia prima en el proceso de extracción |

3.2.1.2 Mecanismo de la Experimentación

Las muestras utilizadas como materia prima en las pruebas, consisten en hojas de la planta de añil de la especie Indigofera guatemalensis Moc. (tercer año de cosecha), las cuales fueron obtenidas de una plantación de añil ubicada en el cantón San Lucas, caserío El Trapichito, municipio de Suchitoto en el departamento de Cuscatlán. En la Fig. 3.2 se muestra el diagrama de flujo del proceso general seguido para extraer el colorante.

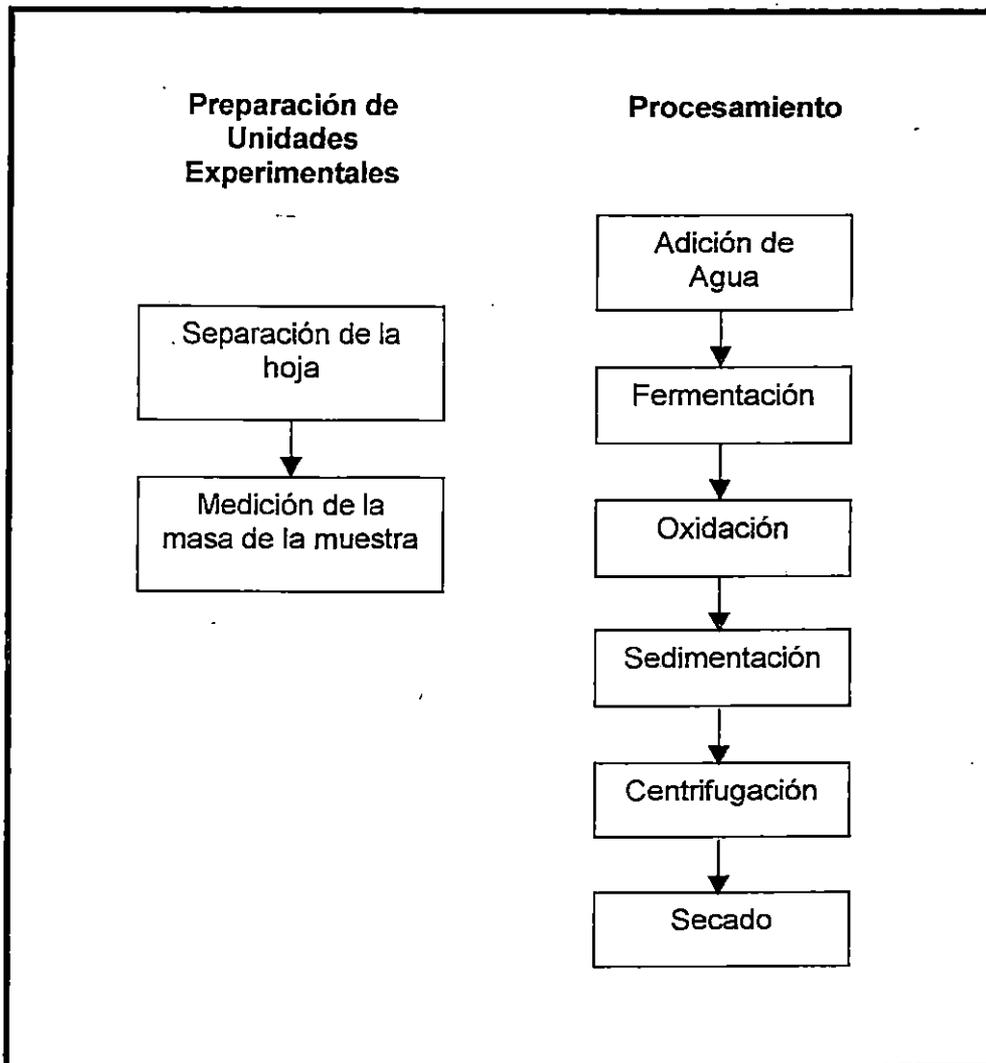


Fig. 3.2 Diagrama de Flujo del Proceso General de Extracción del Colorante de la Planta de Añil

El proceso a seguir consta en primer lugar de una *Separación de la hoja*, acá se separa la hoja de los tallos de la planta, ya que se sabe que el colorante se encuentra en las hojas. Posteriormente, se pesan 50 gr de hojas, haciendo uso de una balanza semi-analítica, éstas se colocan en recipientes plásticos de aproximadamente 2 Lt. de capacidad en donde se les adiciona agua para iniciar la fermentación. Una vez transcurrido el tiempo fijado para ésta etapa, se procede a separar los extractos de los desechos sólidos en un proceso de colado simple. El líquido obtenido en la filtración se airea para hacer precipitar el colorante. Después de la aireación se deja reposar la muestra por un periodo de 24 horas. Una vez finalizada la sedimentación, se separa el extracto sólido de la fase líquida a una velocidad aproximada de 1,000 r.p.m. durante un lapso de 5 minutos. La muestra se coloca en una cápsula de porcelana y se introduce en una estufa a 100°C controlando su peso hasta lograr una humedad aproximada del 10%. El producto obtenido se pesa y se almacena adecuadamente en frascos de vidrio.

3.2.1.3 Análisis Estadístico para el Cribado de Variables

Con el objetivo de estudiar el efecto de diversos factores sobre el porcentaje de indigotina del colorante extraído de la planta de añil, se efectuó un diseño de experimentos factorial fraccionario 2^{k-p} . En donde k representa el número de factores involucrados, y p generadoras independientes.

Se seleccionó el diseño 2^{8-3}_{III} con 32 corridas que implica 8 factores y 3 generadoras independientes, ya que se consideró que con éste número de generadoras se obtenía las mejores relaciones de alias posibles.

Las combinaciones de tratamientos para los ensayos a partir de éste diseño se presentan en la Tabla 3.5. En la Tabla 3.6 se presentan los valores de los factores para los niveles + (máximo) y – (mínimo).

Tabla 3.5 Etapa 1: Codificación de los Factores en Estudio

| No. de Prueba | Masa de agua (A) | Temperatura (B) | Tipo de agua (C) | Tiempo (D) | Agente de Fermentación (E) | Flujo de aire (F) | Peróxido (G) | Hoja (H) |
|---------------|------------------|-----------------|------------------|------------|----------------------------|-------------------|--------------|----------|
| 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| 4 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 |
| 5 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 6 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 7 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 8 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 9 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 10 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 11 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 12 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 |
| 13 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 16 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| 17 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 18 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 |
| 19 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 20 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 21 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 22 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 23 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 24 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 25 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 26 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 27 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 28 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 |
| 29 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 |
| 30 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 |
| 31 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 32 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 |

Tabla 3.6 Etapa 1: Niveles de los Factores y sus Codificaciones

| Nivel | Masa de agua (A) | Temperatura (B) | Tipo de agua (C) | Tiempo (D) | Agente de Fermentación (E) | Flujo de aire (F) | Peróxido (G) | Hoja (H) |
|------------|------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------------------|---------------------|--------------|----------|
| Mínimo (-) | 1:30 | Ambiente | Potable | Menor a 23 hr | No adición | Con paleta | No adición | Fresca |
| Máximo (+) | 1:10 | 60° C | Destilada | Igual a 23 hr | Adición | Con bomba de pecera | Adición | Seca |

Los valores de los factores en la Tabla anterior, se especifican a continuación:

a) Masa de agua:

1:30 - 50 gr de hoja: 1,500 ml H₂O

1:20 - 50 gr de hoja: 500 ml H₂O

b) Temperatura: Temperatura que se deberá mantener en el proceso de fermentación (ambiente o 60°C).

c) Tipo de agua: calidad de agua a utilizar en la etapa de fermentación (potable o destilada).

d) Tiempo:

Menor a 23 hr: - Fermentación: 16 hr

- Oxidación: 2 hr

Igual a 23 hr: - Fermentación: 20 hr

- Oxidación: 3 hr

e) Agente de Fermentación (se cree incentiva el proceso de fermentación): 5% en relación al peso de la hoja (50 gr de hoja * 0.05 = 2.5 gr de caña de azúcar).

f) Flujo de aire: forma de introducir el oxígeno en la etapa oxidativa (con paleta o con bomba de pecera).

g) Peróxido (solución al 50%, se cree incentiva el proceso de oxidación): 5% en relación al volumen de agua utilizada en la etapa fermentativa (para 1,500 ml H₂O: 75 ml de peróxido, para 500 ml H₂O: 25 ml de peróxido)

h) Porcentaje de humedad en hoja seca: contenido de humedad en el material vegetativo a utilizar (35%).

El orden en el que se efectuó en la práctica cada uno de los 32 ensayos se determinó aleatoriamente. En la Tabla 3.7 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 3.7 Etapa 1: Resultados Obtenidos

| No. de Prueba | Masa de agua (A) | Temperatura (B) | Tipo de agua (C) | Tiempo (D) | Agente de Fermentación (E) | Flujo de aire (F) | Peróxido (G) | Hoja (H) | % Ind. |
|---------------|------------------|-----------------|------------------|------------|----------------------------|-------------------|--------------|----------|---------|
| 1 | 1:30 | Ambiente | Destilada | = 23 hr | No adición | Bomba | Adición | Seca | 3.9428 |
| 2 | 1:10 | 60° C | Destilada | < 23 hr | No adición | Bomba | No adición | Seca | 8.1889 |
| 3 | 1:30 | 60° C | Potable | < 23 hr | No adición | Bomba | Adición | Fresca | 23.7580 |
| 4 | 1:10 | Ambiente | Destilada | = 23 hr | No adición | Paleta | No adición | Seca | 6.1670 |
| 5 | 1:10 | Ambiente | Destilada | < 23 hr | No adición | Paleta | Adición | Fresca | 10.0087 |
| 6 | 1:30 | 60° C | Destilada | < 23 hr | Adición | Paleta | Adición | Fresca | 18.7031 |
| 7 | 1:30 | Ambiente | Destilada | < 23 hr | No adición | Bomba | No adición | Fresca | 14.8614 |
| 8 | 1:30 | Ambiente | Potable | = 23 hr | No adición | Paleta | Adición | Fresca | 17.0855 |
| 9 | 1:10 | 60° C | Potable | = 23 hr | Adición | Paleta | Adición | Fresca | 6.7735 |
| 10 | 1:10 | 60° C | Potable | = 23 hr | No adición | Paleta | Adición | Seca | 0.1011 |
| 11 | 1:30 | Ambiente | Destilada | = 23 hr | Adición | Bomba | Adición | Fresca | 3.7406 |
| 12 | 1:10 | Ambiente | Potable | = 23 hr | Adición | Bomba | No adición | Seca | 7.5823 |
| 13 | 1:10 | 60° C | Potable | < 23 hr | No adición | Paleta | No adición | Fresca | 17.2877 |
| 14 | 1:10 | 60° C | Destilada | = 23 hr | No adición | Bomba | Adición | Fresca | 19.7141 |
| 15 | 1:10 | 60° C | Destilada | < 23 hr | Adición | Bomba | No adición | Fresca | 14.2548 |
| 16 | 1:30 | 60° C | Potable | = 23 hr | No adición | Bomba | No adición | Seca | 16.6811 |
| 17 | 1:10 | Ambiente | Potable | = 23 hr | No adición | Bomba | No adición | Fresca | 16.4789 |
| 18 | 1:30 | Ambiente | Destilada | < 23 hr | Adición | Bomba | No adición | Seca | 22.3426 |
| 19 | 1:30 | 60° C | Potable | = 23 hr | Adición | Bomba | No adición | Fresca | 10.0087 |
| 20 | 1:10 | Ambiente | Destilada | = 23 hr | Adición | Paleta | No adición | Fresca | 0.3033 |
| 21 | 1:30 | 60° C | Potable | < 23 hr | Adición | Bomba | Adición | Seca | 4.3472 |
| 22 | 1:10 | Ambiente | Potable | < 23 hr | Adición | Bomba | Adición | Fresca | 2.3252 |
| 23 | 1:10 | Ambiente | Potable | < 23 hr | No adición | Bomba | Adición | Seca | 0.3033 |
| 24 | 1:30 | 60° C | Destilada | = 23 hr | Adición | Paleta | No adición | Seca | 2.1231 |
| 25 | 1:30 | 60° C | Destilada | < 23 hr | No adición | Paleta | Adición | Seca | 10.6153 |
| 26 | 1:30 | 60° C | Destilada | = 23 hr | No adición | Paleta | No adición | Fresca | 26.0041 |
| 27 | 1:10 | 60° C | Destilada | = 23 hr | Adición | Bomba | Adición | Seca | 0.7077 |
| 28 | 1:30 | Ambiente | Potable | < 23 hr | No adición | Paleta | No adición | Seca | 10.4131 |
| 29 | 1:10 | Ambiente | Destilada | < 23 hr | Adición | Paleta | Adición | Seca | 2.5274 |
| 30 | 1:30 | Ambiente | Potable | = 23 hr | Adición | Paleta | Adición | Seca | 0.0000 |
| 31 | 1:30 | Ambiente | Potable | < 23 hr | Adición | Paleta | No adición | Fresca | 30.2282 |
| 32 | 1:10 | 60° C | Potable | < 23 hr | Adición | Paleta | No adición | Seca | 0.3033 |

El análisis de los resultados se llevará a cabo graficando las estimaciones de los efectos de los factores sobre el contenido de indigotina (gráfico de probabilidad normal) y analizando los efectos principales y de sus interacciones a través de un Diagrama de Pareto.

3.2.1.3.1 Estimación de los Efectos de los Factores sobre el Contenido de Indigotina

Esta estimación se hace combinando los datos del contenido de indigotina obtenido para cada ensayo (Ver Tabla 3.7) con las constantes del diseño para el modelo 2_{IV}^{8-3} que se presentan en la Tabla 3.8. A continuación se presenta la estimación del efecto del factor masa de agua (Factor A) :

$$A = -3.9428+8.1889-23.7580+6.1670+10.0087-18.7031-14.8614-17.0855+6.7735+0.1010-3.7406+7.5823+17.2877+19.7141+14.2548-16.6811+16.4789-22.3426-10.0087+0.3033-4.3472+2.3252+0.3033-2.1231-10.6153-28.0041+0.7077-10.4131+2.5274-0.0000-30.2282+0.3033$$

$$A = -103.8273/16 = -6.4892$$

En la Tabla 3.9, se presentan las estimaciones de los efectos de cada factor o combinación del factor, ordenados de mayor a menor.

Tabla 3.9 Etapa 1: Cálculo de las estimaciones de los efectos

| Orden (j) | Efecto | Estimación | $(j-0.5)/28$ |
|-----------|----------|------------|--------------|
| 28 | AD+BG | 3.5195 | 0.9821 |
| 27 | FH | 3.4436 | 0.9464 |
| 26 | EH | 2.7739 | 0.9107 |
| 25 | AF+BC | 2.7233 | 0.8750 |
| 24 | B | 2.0788 | 0.8393 |
| 23 | CH | 1.9524 | 0.8036 |
| 22 | CG+DF | 1.7503 | 0.7679 |
| 21 | AG+BD | 1.5228 | 0.7321 |
| 20 | AC+BF | 1.1816 | 0.6964 |
| 19 | AH | 0.9162 | 0.6607 |
| 18 | AB+CF+DG | 0.6255 | 0.6250 |
| 17 | F | 0.5371 | 0.5893 |
| 16 | DH | 0.4739 | 0.5536 |
| 15 | CE | 0.2337 | 0.5179 |
| 14 | C | 0.1580 | 0.4821 |
| 13 | EF | 0.0063 | 0.4464 |
| 12 | AE | -0.6003 | 0.4107 |
| 11 | EG | -0.9668 | 0.3750 |
| 10 | GH | -1.3711 | 0.3393 |
| 9 | CD+FG | -1.4091 | 0.3036 |
| 8 | D | -3.1909 | 0.2679 |
| 7 | BH | -3.5552 | 0.2321 |
| 6 | BE | -3.5574 | 0.1964 |
| 5 | DE | -4.7832 | 0.1607 |
| 4 | E | -4.8337 | 0.1250 |
| 3 | G | -5.0359 | 0.0893 |
| 2 | A | -6.4892 | 0.0536 |
| 1 | H | -8.5744 | 0.0179 |

A partir de la Tabla 3.9 se construye la gráfica de probabilidad normal, tomando el valor de la columna 4 contra el valor de cada estimación (columna 3). La gráfica se muestra en la figura 3.3.

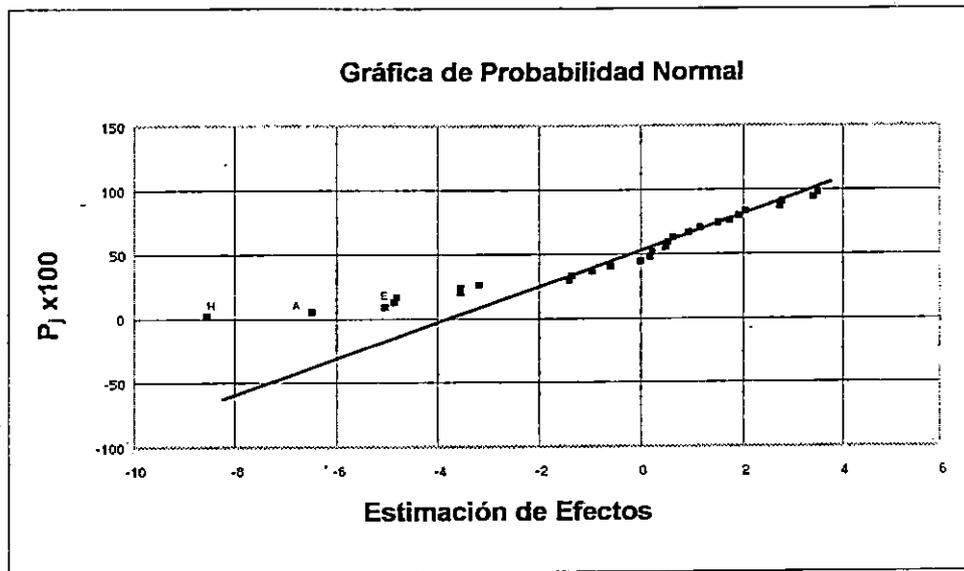


Fig. 3.3 Etapa 1: Gráfica de Probabilidad Normal de los Efectos

Como puede observarse, todos los efectos que se ubican en la línea son despreciables, mientras que los efectos que están más alejados de la recta se consideran muy significativos. Los efectos importantes que se descubren en éste análisis son los efectos principales de los factores masa de agua (A), agente de fermentación (E), y tipo de hoja (H).

3.2.1.3.2 Diagrama de Pareto

Se construyó el diagrama de Pareto utilizando los resultados obtenidos en la Tabla 3.9, en donde cada factor y sus respectivas interacciones se grafican contra las estimaciones de los efectos.

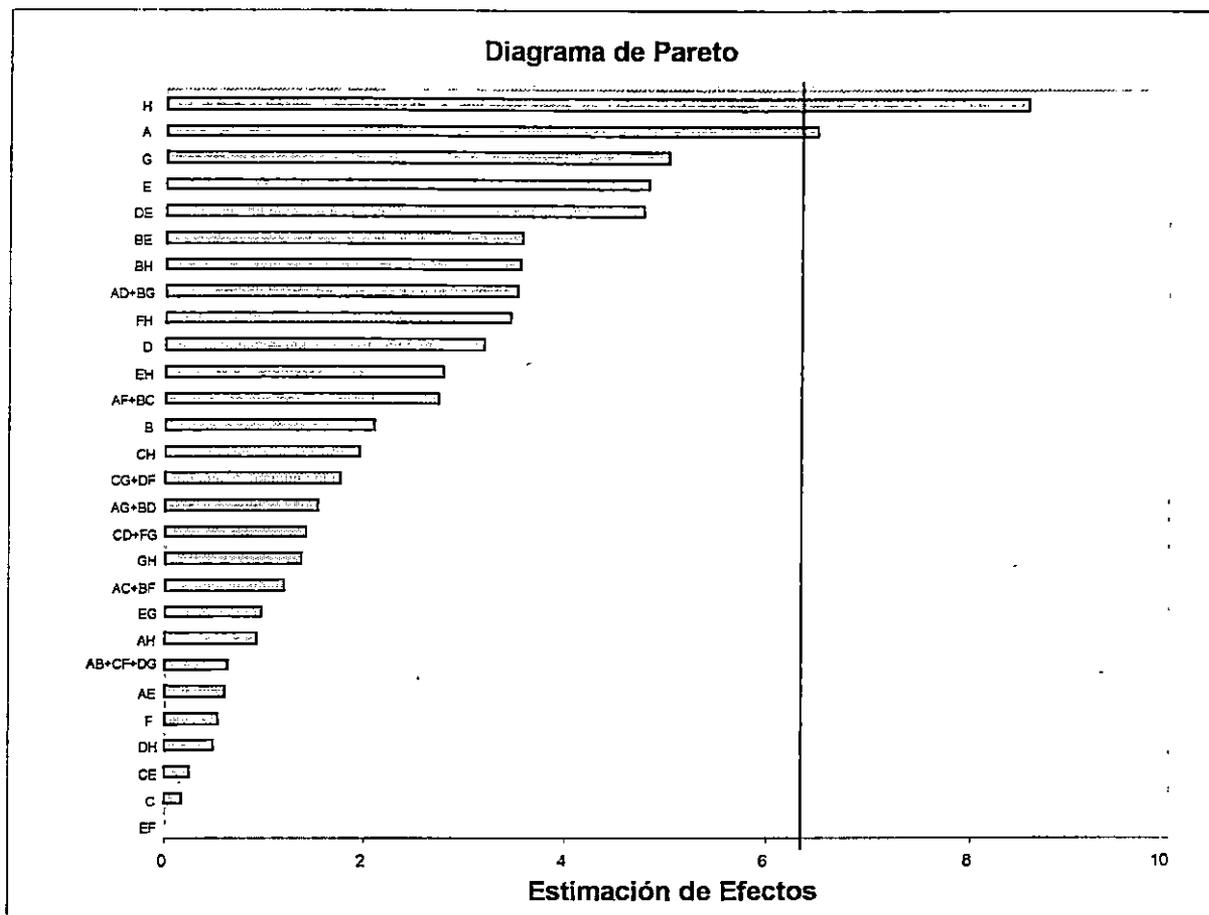


Fig. 3.4 Etapa 1: Diagrama de Pareto

Del diagrama puede observarse que los efectos más significativos sobre el contenido de indigotina son masa de agua (A) y tipo de hoja (H), ya que éstos están situados a la derecha de la línea del nivel de significancia ($\alpha = 0.05$) para los datos estimados.

Ambas gráficas (fig. 3.3 y 3.4) muestran que los efectos más significativos sobre el contenido de indigotina son masa de agua (A), y tipo de hoja (H), pero además, la gráfica de Probabilidad Normal nos muestra como significativo el efecto del factor agente de fermentación (E).

3.2.1.4 Efecto de la Adición de un Carbohidrato que Incentive el Proceso de Fermentación

Según los resultados obtenidos en la etapa anterior, la adición del Agente de Fermentación, en la etapa fermentativa es uno de los factores que se considera significativo en la producción de Indigotina, por lo tanto se procederá a estudiar con mas detalle dicho efecto.

Los dos principales constituyentes químicos de la Caña de Azúcar son la sacarosa en el jugo y la celulosa en la fibra; cada uno de ellos esta compuesto de azúcares simples (glucosa y fructosa).

La sacarosa es el azúcar de uso doméstico e industrial mas conocido, se encuentra en todas las partes de la planta de Caña de Azúcar; y tiene la propiedad de hidrolizarse, ya sea mediante un ácido o la enzima invertasa, la sacarosa produce cantidades equimolares de glucosa y fructosa y la mezcla se conoce como "azúcar invertida".

Por lo anterior, se hace necesario determinar, cual de los dos carbohidratos (sacarosa o glucosa) es el que tiene mayor incidencia en la obtención de Indigotina.

Como se estableció en la Sección 3.2.1, la cantidad del Agente de Fermentación utilizada, en relación al peso de hoja es del 5%, y el porcentaje de sacarosa en la composición de Caña oscila entre 12.5 – 13.0%, por lo que se determinó que las cantidades equivalentes de glucosa y sacarosa a utilizar en el proceso serían, para 50 gr de hoja:

$$50 \text{ gr} * 0.05 * 0.13 = 0.325 \cong 0.33 \text{ gr}$$

Para llevar a cabo dichas pruebas, se analizaron seis muestras, de las cuales, tres se hicieron con glucosa y tres con sacarosa, en donde los niveles elegidos para los factores: masa de agua, temperatura, tipo de agua, tiempo, agente de fermentación, peróxido y tipo de hoja fueron fijados tomando en cuenta el mejor porcentaje de Indigotina obtenido en la etapa anterior, a excepción del factor flujo de aire, el cual se consideró realizar por medio de una bomba de pecera.

En las Tablas 3.10 y 3.11 se presentan los resultados obtenidos utilizando glucosa y sacarosa, respectivamente.

Tabla 3.10 Resultados Obtenidos sobre el Efecto de la Adición de Glucosa en el proceso de Fermentación

| No. de Muestra | Absorbancia | Concentración (ppm) | % de Indigotina |
|-----------------|-------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 0.235 | 3.4858 | 43.5731 |
| 2 | 0.233 | 3.4535 | 43.1687 |
| 3 | 0.227 | 3.3564 | 41.9555 |
| Promedio | 0.2317 | 3.4319 | 42.89910 |

Tabla 3.11 Resultados Obtenidos sobre el Efecto de la Adición de Sacarosa en el proceso de Fermentación

| No. de Muestra | Absorbancia | Concentración (ppm) | % de Indigotina |
|-----------------|-------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 0.1490 | 2.0947 | 26.1843 |
| 2 | 0.1800 | 2.5962 | 32.4524 |
| 3 | 0.2260 | 3.3403 | 41.7533 |
| Promedio | 0.1850 | 2.6771 | 33.4633 |

Como puede observarse, los porcentajes de Indigotina obtenidos adicionando glucosa presentan menor variabilidad y son mayores en relación a los obtenidos con sacarosa.

Para justificar el uso de glucosa en las etapas experimentales posteriores, en lugar de sacarosa, se utilizará la técnica estadística conocida como Prueba de Hipótesis de Igualdad de Varianzas.

El procedimiento a seguir para realizar dicha prueba es:

1. Planteamiento de Hipótesis

Hipótesis nula, H_0 : "No existe diferencia estadística significativa entre las varianzas obtenidas en los experimentos con uso de glucosa y sacarosa en la etapa de fermentación".

Hipótesis alternativa, H_1 : "Existe diferencia estadística significativa entre las varianzas obtenidas en los experimentos con uso de glucosa y sacarosa en la etapa de fermentación".

La comprobación de la hipótesis nula planteada se realiza con un nivel de confianza del 95%, es decir, a un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

2. Estadístico de Prueba

$$F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

Donde: S_1^2 = varianza para prueba con sacarosa

S_2^2 = varianza para prueba con glucosa

La varianza para cada tipo de prueba se calcula:

$$S^2 = \left(\frac{1}{n-1} \right) * \left(\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \right)$$

sustituyendo: $S_1^2 = 7.83358$

$$S_2^2 = 0.84183$$

por lo tanto, $F_o = \frac{S_1^2}{S_2^2} = \frac{(7.83358)^2}{(0.84183)^2} = 86.5908$

3. Criterio de Rechazo

$$F_o > F_{\frac{\alpha}{2}, n_1-1, n_2-1}$$

ó

$$F_o < F_{1-\frac{\alpha}{2}, n_1-1, n_2-1}$$

Para $\alpha = 0.05$, se evalúa (Ver Anexo F)

$$F_{\frac{\alpha}{2}, n_1-1, n_2-1} = F_{\frac{0.05}{2}, 2, 2} = 39.0$$

ó

$$F_{1-\frac{\alpha}{2}, n_1-1, n_2-1} = F_{1-\frac{0.05}{2}, 2, 2} = 0.0256$$

Según los resultados obtenidos, con un nivel de confianza del 95% se encontró suficiente evidencia estadística como para concluir que las varianzas en las dos pruebas son distintas, es decir, que existe diferencia estadística significativa entre las varianzas obtenidas en los experimentos con uso de glucosa y sacarosa en la etapa de fermentación, por lo tanto, las etapas posteriores se llevarán a cabo con el carbohidrato que presenta menor varianza (o menor variabilidad), en este caso: Glucosa.

3.2.2 Etapa 2: Establecimiento de los Niveles de los Factores más Significativos que permitan iniciar la Etapa de Optimización.

Como se determinó en las etapas anteriores, los factores que tienen mayor influencia en la variable respuesta son: Masa de Agua, Tipo de Hoja y Glucosa, por lo tanto, se desarrollará una etapa experimental haciendo uso de un diseño factorial fraccionario 2^k , aumentado con cuatro puntos centrales, con el objetivo de determinar los niveles de estos factores que permitan iniciar la etapa de optimización.

Se consideró incluir el factor tiempo de oxigenación en el diseño factorial de esta etapa, ya que es en la etapa de oxigenación donde se dá el verdadero proceso químico (la reacción química).

El proceso de extracción a seguir es igual al efectuado en la primera etapa, (Figura 3.2) con la variante que se duplicó el tamaño de muestra y se diseñó una planta a escala de banco para llevar a cabo dicho proceso (Figura 3.5).

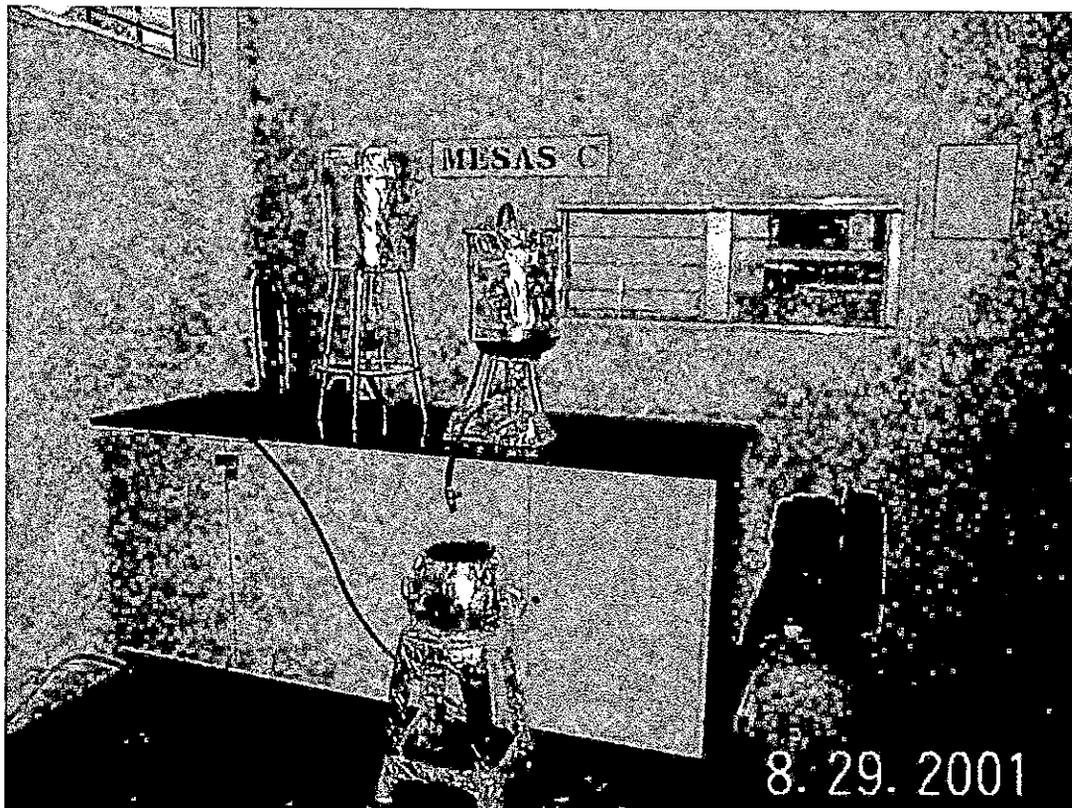


Fig. 3.5 Planta a Escala de Banco para la Extracción del Colorante de la Planta de Añil

3.2.2.1 Aplicación de Análisis Estadístico para el Establecimiento de los Niveles de los Factores más Significativos

Se usará un modelo 2^4 , aumentado con cuatro puntos centrales, lo que implica un total de 20 ensayos.

Las combinaciones de tratamientos para los ensayos a partir de este diseño se presentan en el Tabla 3.12.

En la Tabla 3.13 se presentan los valores de las variables para los niveles + (máximo) y – (mínimo) y el punto central (0).

Tabla 3.12 Etapa 2: Codificación de los Factores en Estudio

| No. de Prueba | Masa de agua (A) | Hoja (B) | Glucosa (C) | Tiempo de Oxigenación (D) |
|---------------|------------------|----------|-------------|---------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | 1 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 9 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 10 | -1 | -1 | -1 | 1 |
| 11 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 12 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 13 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| 14 | 1 | 1 | -1 | 1 |
| 15 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 16 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 19 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 20 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 3.13 Etapa 2: Niveles de los Factores y sus Codificaciones

| Nivel | Masa de agua (A) | Tipo de Hoja (%H) (B) | Glucosa (gr.) (C) | Tiempo de Oxigenación (min.) (D) |
|-------------|------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------------|
| Mínimo (-) | 1:20 | 70 | 0.7 | 15 |
| Central (0) | 1:30 | 85 | 1.4 | 25 |
| Máximo (+) | 1:40 | 100 | 2.1 | 35 |

* tiempo de fermentación: 18 horas
 * nivel de oxigenación: 3 psi

En la Tabla 3.14 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 3.14 Etapa 2: Resultados Obtenidos

| No. de Prueba | Masa de agua (A) | Tipo de Hoja (%H) (B) | Glucosa (gr.) (C) | Tiempo de Oxigenación (min.) (D) | % Ind. |
|---------------|------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------------|---------|
| 1 | 1:30 | 85 | 1.4 | 25 | 20.3206 |
| 2 | 1:20 | 70 | 2.1 | 35 | 28.8128 |
| 3 | 1:30 | 85 | 1.4 | 25 | 21.1294 |
| 4 | 1:20 | 100 | 2.1 | 35 | 29.4194 |
| 5 | 1:40 | 70 | 2.1 | 15 | 24.7689 |
| 6 | 1:40 | 70 | 2.1 | 35 | 21.5338 |
| 7 | 1:30 | 85 | 1.4 | 25 | 20.7250 |
| 8 | 1:40 | 100 | 0.7 | 15 | 31.6436 |
| 9 | 1:20 | 70 | 0.7 | 15 | 24.3645 |
| 10 | 1:20 | 70 | 0.7 | 35 | 39.5292 |
| 11 | 1:20 | 100 | 0.7 | 15 | 32.4524 |
| 12 | 1:40 | 100 | 2.1 | 15 | 22.1404 |
| 13 | 1:20 | 100 | 0.7 | 35 | 32.2502 |
| 14 | 1:40 | 100 | 0.7 | 35 | 20.9272 |
| 15 | 1:40 | 70 | 0.7 | 15 | 21.3316 |
| 16 | 1:20 | 100 | 2.1 | 15 | 23.1514 |
| 17 | 1:30 | 85 | 1.4 | 25 | 21.9382 |
| 18 | 1:40 | 70 | 0.7 | 35 | 20.5228 |
| 19 | 1:20 | 70 | 2.1 | 15 | 22.9492 |
| 20 | 1:40 | 100 | 2.1 | 35 | 22.7470 |

3.2.2.1.1 Análisis de los Resultados

En la Tabla 3.15 se presentan las estimaciones de los efectos de cada factor o combinación del factor, ordenados de mayor a menor.

Tabla 3.15 Etapa 2: Cálculo de las estimaciones de los efectos

| Orden (j) | Efecto | Estimación | $(j-0.5)/10$ |
|-----------|--------|------------|--------------|
| 10 | AC | 2.62854 | 0.95 |
| 9 | D | 1.61756 | 0.85 |
| 8 | B | 1.36482 | 0.75 |
| 7 | AB | 0.960428 | 0.65 |
| 6 | CD | 0.758233 | 0.55 |
| 5 | BC | -1.51646 | 0.45 |
| 4 | BD | -2.62854 | 0.35 |
| 3 | C | -3.43732 | 0.25 |
| 2 | AD | -5.15598 | 0.15 |
| 1 | A | -5.91421 | 0.05 |

A partir de la Tabla 3.15 se construyen las gráficas de Probabilidad Normal y el Diagrama de Pareto, las cuales se muestran en las figuras 3.6 y 3.7 respectivamente.

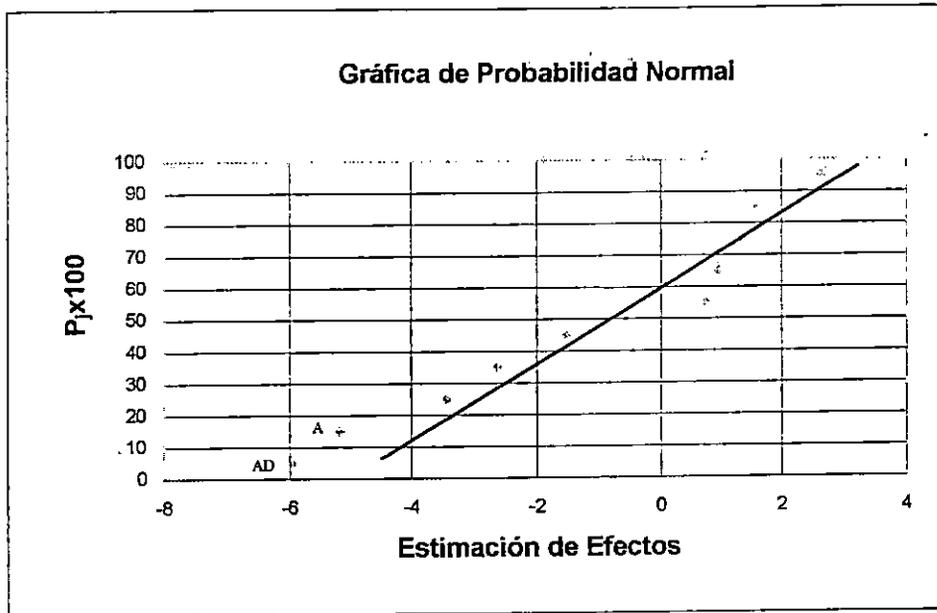


Figura 3.6 Etapa 2: Gráfica de Probabilidad Normal de los efectos

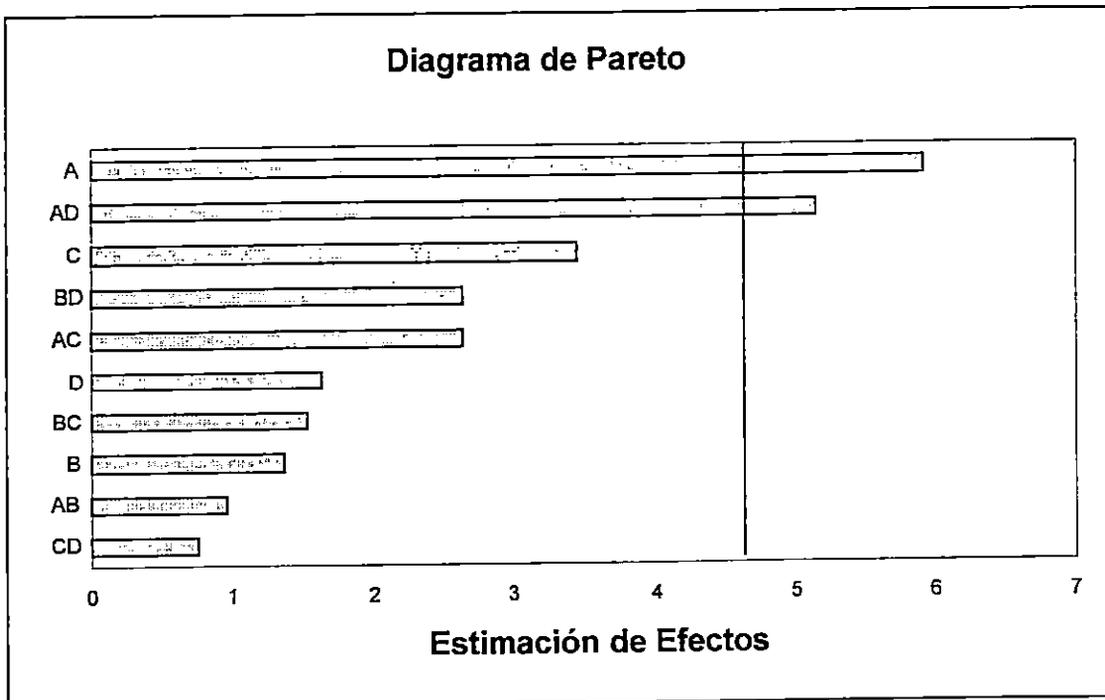


Figura 3.7 Etapa 2: Diagrama de Pareto

Ambas gráficas (figura 3.6 y figura 3.7) muestran que los efectos más significativos sobre el contenido de indigotina son: el factor Masa de Agua (A) y la interacción Masa de Agua (A) – Tiempo de Oxigenación (D)

El gráfico de los efectos principales vrs. % de indigotina (figura 3.8) nos muestra que tanto el factor Masa de Agua (A) como el factor Glucosa (C), presentan una tendencia a aumentar el porcentaje de indigotina, cuando sus niveles tienden al mínimo, mientras que el efecto de los factores Tipo de Hoja (B) y Tiempo de Oxigenación (D) aumentan cuando sus niveles tienden al máximo.

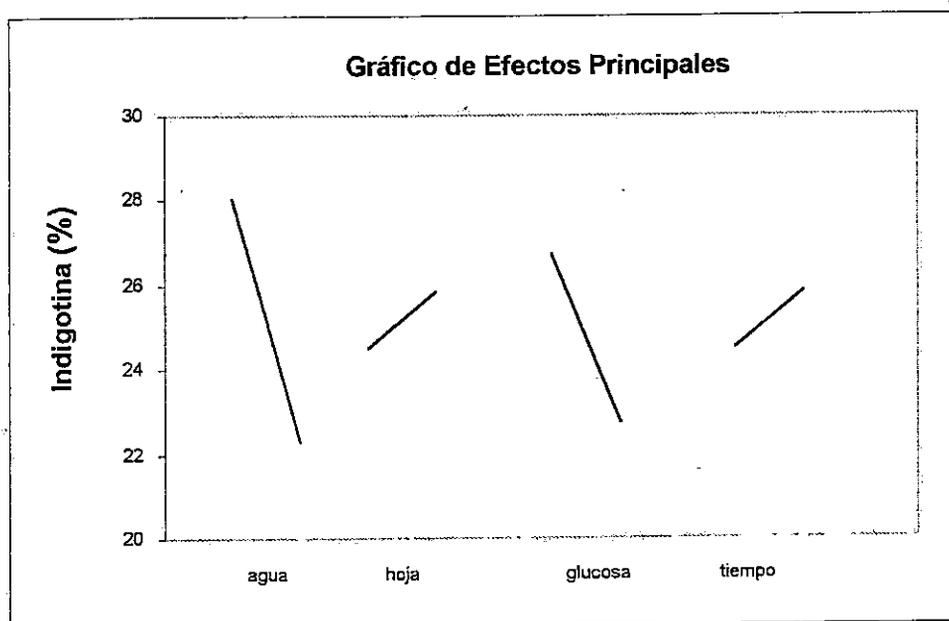


Figura 3.8 Gráfico de Efectos Principales

Con los resultados obtenidos, se logró establecer que los niveles de los factores: Masa de Agua (A), Tipo de Hoja (B) y Glucosa (C) son:

- a) Masa de Agua: Mínimo
- b) Tipo de Hoja: Máximo
- c) Glucosa: Mínimo

En donde el nivel mínimo de Masa de Agua corresponde a la relación 1:20, el nivel máximo del tipo de Hoja al uso de hoja fresca (100% humedad) y el nivel mínimo de Glucosa al 5% con respecto al tamaño de muestra (cantidad de hoja).

3.3 Desarrollo del Proceso de Optimización

3.3.1 Aplicación del Análisis de Superficie de Respuesta

Con el objetivo de encontrar los niveles de los factores que vuelven óptimo el proceso de extracción, se efectuó un análisis de superficie de respuesta (Anexo G), en donde los factores que se consideraron para éste análisis fueron aquellos que intervienen en la etapa de oxigenación (presión y tiempo de oxigenación), ya que es aquí, donde sucede la reacción química propiamente hablando, es decir, el paso de indoxil a indigo.

El análisis de superficie de respuesta se divide en dos etapas:

- a) Ajuste de un modelo de primer orden, y
- b) Ajuste de un modelo de segundo orden.

3.3.1.1 Aplicación de la Etapa de Primer Orden

3.3.1.1.1 Diseño y Ensayos para la Etapa de Primer Orden

Para la etapa de primer orden se usará un modelo 2^2 , con cuatro puntos centrales, lo que implica un total de 8 ensayos.

Las combinaciones de tratamientos para los ensayos a partir de este modelo se presentan en la Tabla 3.15. Además en la Tabla 3.16 se presentan los valores de los factores para los niveles + (máximo), - (mínimo) y el punto central (0).

Tabla 3.16 Codificación de los Factores en Estudio para la Etapa de Primer Orden

| No. de Prueba | Presión (A) | Tiempo (B) |
|---------------|-------------|------------|
| 1 | -1 | -1 |
| 2 | -1 | +1 |
| 3 | +1 | -1 |
| 4 | +1 | +1 |
| 5 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 |

Tabla 3.17 Niveles de los Factores y sus Codificaciones para la Etapa de Primer Orden

| Nivel | Presión (Psi) (A) | Tiempo (min) (B) |
|-------------|----------------------|---------------------|
| Mínimo (-) | 15 | 30 |
| Central (0) | 20 | 35 |
| Máximo (+) | 25 | 40 |

El orden en el que se efectuó en la práctica cada uno de los 8 ensayos se determinó aleatoriamente. En la Tabla 3.17 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 3.18 Resultados Obtenidos en la Etapa de Primer Orden

| No. de Prueba | Presión (Psi) (A) | Tiempo (min.) (B) | % Indigotina |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------|
| 1 | 15 | 30 | 48.625 |
| 2 | 15 | 40 | 42.563 |
| 3 | 25 | 30 | 36.500 |
| 4 | 25 | 40 | 52.675 |
| 5 | 20 | 35 | 44.588 |
| 6 | 20 | 35 | 46.600 |
| 7 | 20 | 35 | 42.563 |
| 8 | 20 | 35 | 49.038 |

3.3.1.1.2 Análisis de los Resultados para la Etapa de Primer Orden

Este análisis se realizará graficando las estimaciones de los efectos de los factores sobre el contenido de indigotina.

En la Tabla 3.19 se presentan las estimaciones de los efectos de cada factor o combinación del factor, ordenados de mayor a menor.

Tabla 3.19 Cálculo de las estimaciones de los efectos en la Etapa de Primer Orden

| Orden (j) | Efecto | Estimación | $(j-0.5)/3$ |
|-----------|--------|------------|-------------|
| 3 | AB | 11.1185 | 0.83 |
| 2 | B | 5.065 | 0.50 |
| 1 | A | -1.065 | 0.17 |

A partir de la Tabla 3.19 se construyen las gráficas de Probabilidad Normal y el Diagrama de Pareto, las cuales se muestran en las figuras 3.9 y 3.10 respectivamente.

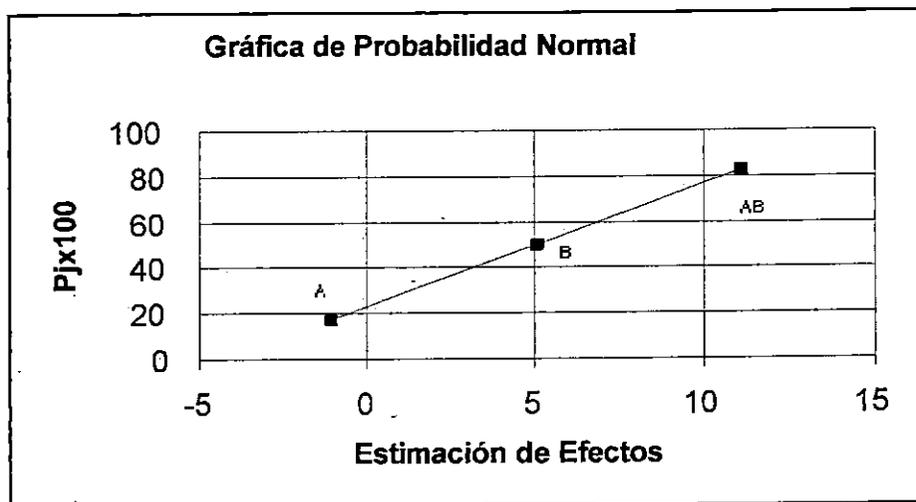


Figura 3.9 Gráfica de Probabilidad Normal de los efectos para la Etapa de Primer Orden

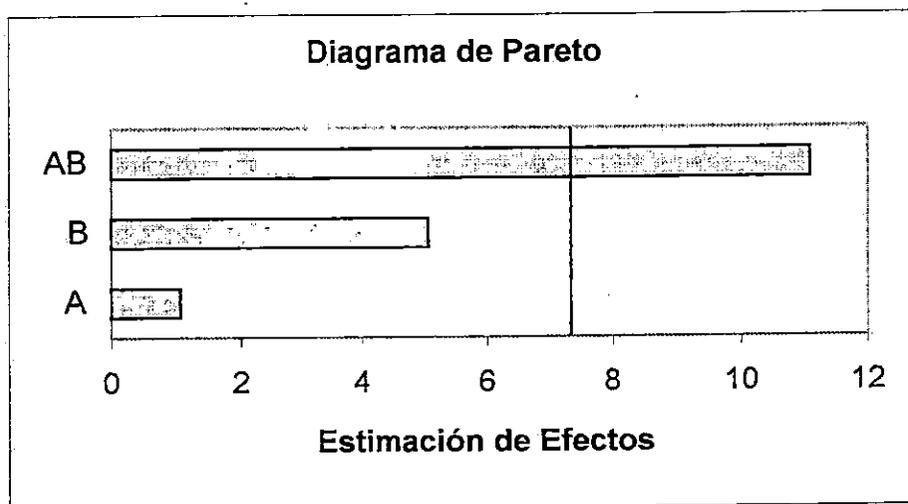


Figura 3.10 Diagrama de Pareto para la Etapa de Primer Orden

Como puede observarse la Gráfica de Probabilidad Normal no muestra efectos significativos sobre el contenido de indigotina, sin embargo, el Diagrama de Pareto muestra la interacción Presión (A) – Tiempo (B) como efecto significativo.

Con los resultados obtenidos en la Tabla 3.17 se procedió a ajustar un modelo lineal de primer orden, el cual describe la relación entre el contenido de indigotina (variable respuesta) y la presión y el tiempo de oxigenación (variables explicativas).

La ecuación ajustada para este modelo es:

$$\text{Indigotina} = 45.394 - 0.050325 \cdot P + 2.52825 \cdot t \quad (3.1)$$

Donde:

P: Presión de oxigenación

t: tiempo de oxigenación

El análisis de significancia de los parámetros del modelo se presenta en la Tabla 3.20 y la significancia del modelo general de primer orden se presenta en la Tabla 3.21

Tabla 3.20 Análisis de Significancia de los Parámetros del Modelo de Primer Orden

| Variable dependiente: Indigotina | | | | |
|----------------------------------|------------|----------------|---------------|------------------------|
| Parámetro | Estimación | Error estándar | Estadístico t | Nivel de Significancia |
| Constante | 45.394 | 1.91955 | 23.6483 | 0.0000 |
| P | -0.50325 | 2.71465 | -0.185383 | 0.8602 |
| t | 2.52825 | 2.71465 | 0.931336 | 0.3944 |

Tabla 3.21 Análisis de Varianza del Modelo General de Primer Orden

| Superficie | Suma de Cuadrados | Grados de Libertad | Media de Cuadrados | F-ratio | Nivel de Significancia |
|---------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------|------------------------|
| Modelo | 26.5812 | 2 | 13.2906 | 0.45 | 0.6606 |
| Residuos | 147.386 | 5 | 29.4773 | | |
| Total (corr.) | 173.967 | 7 | | | |

R-cuadrado = 15.2794%

R-cuadrado (ajustado) = 0.0%

Estimación del error estándar = 5.4293

Media del error absoluto = 3.8405

Estadístico de Durbin – Watson = 1.83975

De estos análisis puede concluirse que el modelo de primer orden no es significativo, ya que el nivel de significancia para el modelo en general es mayor que $\alpha = 0.1$ ($0.6606 > 0.1$). El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica únicamente el 15.2794% de la variabilidad observada en el contenido de indigotina.

De los resultados obtenidos en la Tabla 3.20 puede observarse, que ningún factor presenta nivel de significancia de 0.1 o menor, por lo que puede decirse que el efecto lineal de ambos factores no es estadísticamente significativo a un 90% de confianza.

El test estadístico de residuos de Durbin – Watson, el cual determina si existe una autocorrelación significativa en el orden de los datos mayor a 1.4, confirma que no existe evidencia de autocorrelación entre las variables independientes.

Debido a que el modelo de primer orden no es significativo, el camino a seguir para acercarse a las condiciones óptimas de extracción será una estrategia de segundo orden en la que se ajustará un modelo cuadrático.

Para adoptar los nuevos valores centrales, se realizará el Método de Máxima Pendiente, el que nos servirá para encontrar el nuevo punto central para aplicar la estrategia de segundo orden.

3.3.1.1.3 Método de Máxima Pendiente

En este momento del experimento, la estrategia que se adoptará es la de experimentar a lo largo de la ruta en ascenso. Esta es la ruta a partir de la región central de experimento actual a lo largo de la cual la respuesta estimada cambia más rápidamente con cambios pequeños en los factores experimentales.

La Tabla 3.22 muestra la ruta en ascenso para el factor tiempo. Se han generado 6 puntos cambiando el factor tiempo en incrementos de 1.0. Puede observarse también, el valor de la variable respuesta (indigotina) pronosticada para cada punto.

Tabla 3.22 Ruta en Ascenso para el Factor Tiempo

| Punto | Presión | Tiempo | % Indigotina pronosticada |
|-------|----------|--------|---------------------------|
| 1 | 0.0 | 0.0 | 45.3940 |
| 2 | 0.543441 | 1.0 | 50.6699 |
| 3 | 1.49737 | 2.0 | 66.3455 |
| 4 | 2.48263 | 3.0 | 93.1341 |
| 5 | 3.47544 | 4.0 | 131.0410 |
| 6 | 4.47119 | 5.0 | 180.0670 |

Para obtener los nuevos puntos de experimentación se consideró trabajar con los cuatro primeros puntos mostrados en la Tabla 3.22, ya que éstos presentan valores lógicos en relación al contenido de indigotina pronosticado.

Para convertir los tamaños de incremento codificados en las unidades naturales de presión y tiempo se utilizan las expresiones siguientes:

$$P = 20 + 5X_1 \quad (3.2)$$

$$t = 35 + 5X_2 \quad (3.3)$$

En la Tabla 3.23 se presentan los resultados de los experimentos adicionales hechos a lo largo de la ruta en ascenso para el factor tiempo, con el objeto de definir el valor del nuevo punto central para el ajuste del modelo de segundo orden.

Tabla 3.23 Experimentos Adicionales a lo Largo de la Ruta en Ascenso para el Factor Tiempo

| Punto | Presión (Psi) | Tiempo (min.) | % Indigotina |
|-------|---------------|---------------|--------------|
| 1 | 20.0 | 35.0 | 36.4963 |
| 2 | 22.7 | 40.0 | 39.5288 |
| 3 | 27.5 | 45.0 | 28.4088 |
| 4 | 32.4 | 50.0 | 43.5725 |

De acuerdo a los datos de la Tabla 3.23 en las condiciones de 32.4 Psi y 50.0 min., se da el valor más alto de contenido de indigotina (43.5725%), por tanto este punto será usado como punto central para las pruebas en la estrategia de segundo orden.

3.3.1.2 Aplicación de la Estrategia de Segundo Orden

Para efectuar el ajuste del modelo de segundo orden se usará el diseño *Compuesto Central Rotable dividido Ortogonalmente en Bloques*, el cual además de satisfacer las condiciones de ortogonalidad y rotabilidad, considerando la formación de bloques nos permitirá eliminar variables inconvenientes que puedan afectar nuestro experimento.

En nuestro caso, el hecho de realizar la experimentación en diferentes tiempos, añade variabilidad al experimento, pues el estado de madurez de la planta no es el mismo.

El diseño ha sido dispuesto en dos bloques, el primero consiste en la parte factorial del diseño más tres puntos centrales y el segundo consiste en los puntos axiales más tres puntos centrales extra, y plantea en general 14 ensayos en los que se combinan los niveles de las variables involucradas.

En la Tabla 3.24 se presentan las variables y sus niveles de prueba, y en la Tabla 3.25 se presentan las condiciones de tratamiento para los 14 ensayos.

Tabla 3.24 Niveles de los Factores y sus Codificaciones para la Estrategia de Segundo Orden

| Nivel (código) | Presión (Psi) | Tiempo (min) |
|---------------------|---------------|--------------|
| α (-1.41421) | 25.3 | 43.0 |
| Mínimo (-) | 27.4 | 45.0 |
| Central (0) | 32.4 | 50.0 |
| Máximo (+) | 37.4 | 55.0 |
| α (+1.41421) | 39.5 | 57.0 |

Tabla 3.25 Codificación de los Factores en Estudio para la Estrategia de Segundo Orden

| Bloque | Presión | Tiempo |
|--------|----------|----------|
| 1 | -1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | -1 | -1 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | -1 |
| 2 | 0 | 1.41421 |
| 2 | 0 | 0 |
| 2 | -1.41421 | 0 |
| 2 | 1.41421 | 0 |
| 2 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | -1.41421 |
| 2 | 0 | 0 |

Después de haber elegido el modelo de segundo orden *Compuesto Central Rotable dividido Ortogonalmente en Bloques*, y realizado las pruebas aleatoriamente se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3.26

Tabla 3.26 Resultados Obtenidos en la Etapa de Segundo Orden

| Bloque | Presión (Psi) | Tiempo (min.) | % Indigotina |
|--------|---------------|---------------|--------------|
| 1 | 27.4 | 55.0 | 36.4963 |
| 1 | 32.4 | 50.0 | 44.5838 |
| 1 | 32.4 | 50.0 | 50.2450 |
| 1 | 37.4 | 55.0 | 49.2350 |
| 1 | 27.4 | 45.0 | 49.6388 |
| 1 | 32.4 | 50.0 | 50.6488 |
| 1 | 37.4 | 45.0 | 39.5288 |
| 2 | 32.4 | 57.0 | 47.6175 |
| 2 | 32.4 | 50.0 | 57.7263 |
| 2 | 25.3 | 50.0 | 47.6173 |
| 2 | 39.5 | 50.0 | 28.4088 |
| 2 | 32.4 | 50.0 | 45.5950 |
| 2 | 32.4 | 43.0 | 48.6275 |
| 2 | 32.4 | 50.0 | 46.6063 |

El modelo de segundo orden ajustado a partir de los datos de la Tabla 3.26 se presenta a continuación, ecuación (3.4)

$$\text{Indigotina} = 49.2342 - 3.02837 * P - 0.608083 * t - 5.40535 * P^2 + 5.71218 * P * t - 0.405275 * t^2 \quad (3.4)$$

El análisis de significancia de los parámetros del modelo se presentan en la Tabla 3.27 y el análisis de significancia general del modelo de segundo orden ajustado se presenta en la Tabla 3.28.

Tabla 3.27 Análisis de Significancia de los Parámetros del Modelo de Segundo Orden

| Parámetro | Coefficientes | Estimación del Error | Estadístico | Nivel de Significancia |
|----------------|---------------|----------------------|-------------|------------------------|
| Constante | 49.2342 | 2.17375 | 22.6494 | 0.0000 |
| P | -3.02837 | 1.88253 | -1.60867 | 0.1464 |
| t | -0.608083 | 1.88253 | -0.323014 | 0.7550 |
| P ² | -5.40535 | 1.9594 | -2.75867 | 0.0247 |
| t ² | -0.405275 | 1.9594 | -0.206836 | 0.8413 |
| P*t | 5.71218 | 2.66229 | 2.14550 | 0.0642 |

Tabla 3.28 Análisis de Varianza del Modelo General de Segundo Orden

| Superficie | Suma de Cuadrados | Grados de Libertad | Media de Cuadrados | F-ratio | Nivel de Significancia |
|---------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------|------------------------|
| Modelo | 422.603 | 5 | 64.5206 | 2.98 | 0.0823 |
| Residuos | 226.81 | 8 | 28.3512 | | |
| Total (corr.) | 649.413 | 13 | | | |

R-cuadrado = 65.0746%

R-cuadrado (ajustado) = 43.2463%

De la Tabla 3.27 puede observarse cuales efectos son significativos y cuales no, siempre por comparación del nivel de significancia de la Tabla (columna 5) con un $\alpha = 0.1$. De acuerdo a esta Tabla, los efectos significativos son:

- El efecto cuadrático de la presión de oxigenación (P²)
- El efecto de interacción de la presión y el tiempo de oxigenación (P*t)

Según el análisis de significancia, el modelo cuadrático es significativo a un $\alpha = 0.1$, y explica según el valor de R^2 ajustado, el 43.2463% de la variabilidad observada en el contenido de indigotina.

El valor de R cuadrado obtenido es bastante aceptable, lo cual respalda la adecuación del modelo cuadrático. Además, como puede verse en la figura 3.11 (gráfica de Tendencia de Residuos), no existe ninguna tendencia apreciable en los residuos respecto a los valores predichos, lo que contribuye a la aceptación del modelo cuadrático planteado.

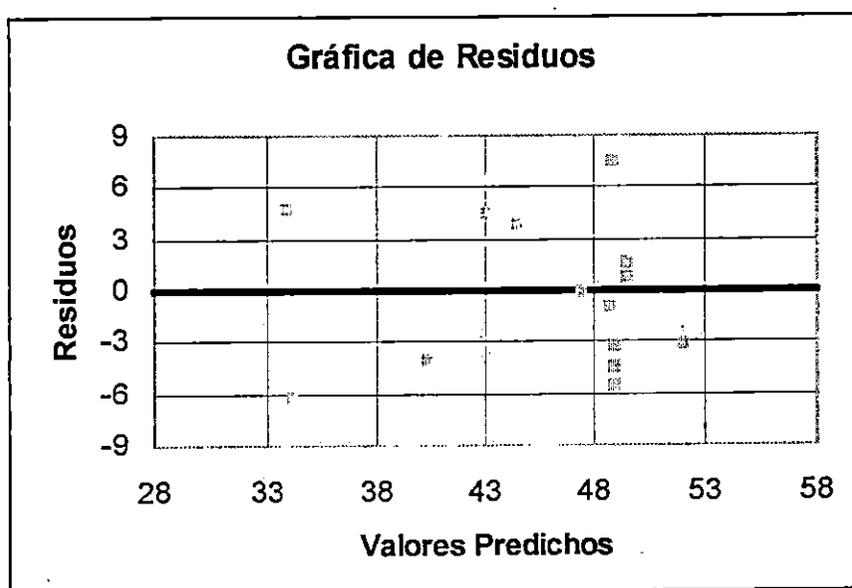


Figura 3.11 Gráfica de Tendencia de Residuos

Comprobada la idoneidad del modelo, se procede a calcular la coordenada del punto estacionario (punto máximo, punto mínimo o punto de silla).

3.3.1.2.1 Localización del Punto Estacionario

Si se desea determinar el punto en el que los niveles de los efectos de los factores optimizan la extracción del colorante, se tendrá que obtener el punto estacionario. Este punto puede ser un máximo, un mínimo o un punto de silla y se obtiene a partir de derivar parcialmente la función de contenido de indigotina, respecto a cada factor e igualar a cero.

$$\frac{d\text{Indigotina}}{dP} = 0 \qquad \frac{d\text{Indigotina}}{dt} = 0$$

Para obtener el punto estacionario se puede usar también una notación matricial para el modelo de segundo orden.

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + X'b + X'BX \quad (3.5)$$

En donde

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \qquad b = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} \beta_{11}, \beta_{12}/2, \dots, \beta_{1K}/2 \\ \beta_{21}, \beta_{22}, \dots, \beta_{2K}/2 \\ \dots \\ \beta_{K1}, \dots, \beta_{KK} \end{bmatrix}$$

En otras palabras, b es el vector ($K \times 1$) de coeficientes de regresión de primer orden, y B es una matriz simétrica ($K \times K$) cuya diagonal principal esta formada por los coeficientes de los términos cuadráticos puros (β_{ii}), mientras que los elementos fuera de esta diagonal corresponden a un medio del valor de los coeficientes cuadráticos mixtos.

En la Tabla 3.29, se presentan los coeficientes del modelo de segundo orden.

Tabla 3.29 Coeficientes de Regresión para el Modelo Cuadrático

| | | |
|----------------------|-----------|-----------|
| Constante | 49.2342 | |
| P: Presión | | -3.02837 |
| t: tiempo | | -0.608083 |
| P*t | 5.71217 | |
| P² | -5.40535 | |
| t² | -0.405275 | |

El punto estacionario puede calcularse a partir de (Montgomery, 1991)

$$X_o = -\frac{1}{2} B^{-1} b \quad (3.6)$$

Por tanto la respuesta predicha en el punto estacionario vendrá dada por (Montgomery, 1991):

$$\hat{Y}_o = \hat{\beta}_0 + \frac{1}{2} X_o' b \quad (3.7)$$

Para nuestro análisis los coeficientes para elaborar las matrices b y B se obtienen de la ecuación 3.4 o de la Tabla 3.29.

$$b = \begin{bmatrix} -3.02837 \\ -0.608083 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -5.40535 & 2.856085 \\ 2.856085 & -0.405275 \end{bmatrix}$$

Resolviendo la ecuación 3.6, el punto estacionario es:

$$X_o = \begin{bmatrix} 0.248389 \\ 1.000255 \end{bmatrix}$$

En otras palabras, $X_1 = 0.248389$ y $X_2 = 1.000255$. En términos de las variables naturales el punto estacionario es:

de donde? con criterios de donde lo encontramos.

$$P = 20 + 5X_1 = 20 + 5(0.248389) = 21.24 \text{ Psi}$$

$$t = 35 + 5X_2 = 35 + 5(1.000255) = 40.00 \text{ min}$$

Usando la ecuación 3.7 se determina que la respuesta predicha en el punto estacionario es:

$$\hat{Y}_{(\text{Indigotina})} = 49.2342 - 0.68023$$

$\text{Indigotina} = 48.554\%$

3.3.1.2.2 Caracterización de la Superficie de Respuesta

Una vez que se ha hallado el punto estacionario, suele ser necesario caracterizar la superficie de respuesta en la vecindad inmediata de este punto. Por caracterizar se entiende determinar si el punto estacionario es un punto de respuesta máxima o mínima o un punto silla.

Primero, es necesario expresar el modelo ajustado en forma canónica:

$$\hat{Y} = \hat{Y}_o + \lambda_1 W_1^2 + \lambda_2 W_2^2 + \dots + \lambda_k W_k^2 \quad (3.8)$$

donde las $\{W_i\}$ son las variables independientes transformadas y las $\{\lambda_i\}$ son constantes. Además, las $\{\lambda_i\}$ son justamente los valores propios (también llamados raíces características, autovalores o eigenvalores) de la matriz B.

Para nuestro análisis:

$$|B - \lambda| = 0$$

$$\begin{bmatrix} -5.40535 - \lambda & 2.856085 \\ 2.856085 & -0.405275 - \lambda \end{bmatrix}$$

que se reduce a

$$\lambda^2 + 5.810625\lambda + 2.19065 = 0 \quad (3.9)$$

Las raíces de esta ecuación cuadrática son $\lambda_1 = -0.4053$ y $\lambda_2 = -5.4054$. Por lo tanto, la forma canónica del modelo ajustado es

$$\hat{Y} = 48.554 - 0.4053W_1^2 - 5.4054W_2^2 \quad (3.10)$$

Se concluye que el punto estacionario es máximo porque tanto λ_1 como λ_2 son negativos.

3.3.1.2.3 Obtención del Mejor Ajuste que Describe el Comportamiento del Contenido de Indigotina

Dado que, durante el desarrollo experimental llevado a cabo, se obtuvieron valores de contenidos de indigotina superiores al obtenido en el punto estacionario, se buscó ajustar un modelo que pudiera describir mejor el comportamiento del contenido de indigotina.

El mejor modelo ajustado se presenta en la ecuación 3.11

$$\text{Indigotina} = 48.9848 + 5.71218 \cdot P \cdot t - 5.37418 \cdot P^2 \quad (3.11)$$

En las Tablas 3.30 y 3.31 se presenta el análisis de significancia del modelo.

Tabla 3.30 Análisis de Regresión Múltiple para el Modelo Ajustado

| Variable dependiente: Indigotina | | | | |
|----------------------------------|------------|----------------|---------------|------------------------|
| Parámetro | Estimación | Error estándar | Estadístico t | Nivel de Significancia |
| Constante | 48.9848 | 1.78675 | 27.4156 | 0.0000 |
| P*t | 5.71218 | 2.63002 | 2.17191 | 0.0526 |
| P ² | -5.37418 | 1.92992 | -2.78467 | 0.0178 |

Tabla 3.31 Análisis de Varianza para el Modelo Ajustado

| Superficie | Suma de Cuadrados | Grados de Libertad | Media de Cuadrados | F-ratio | Nivel de Significancia |
|---------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------|------------------------|
| Modelo | 345.064 | 2 | 172.532 | 6.24 | 0.0155 |
| Residuos | 304.349 | 11 | 27.6681 | | |
| Total (corr.) | 649.413 | 13 | | | |

R-cuadrado = 53.1348%

De la ecuación 3.11 y del Análisis de significancia puede concluirse que los efectos influyentes son: el efecto cuadrático de la presión (P^2) y el de la interacción Presión-tiempo ($P*t$).

El modelo adquiere validez, ya que al observar el nivel de significancia de los parámetros y del modelo en sí, son menores que $\alpha = 0.1$.

Si se buscan los niveles más adecuados de estos factores para el sistema, puede obtenerse lo siguiente:

$$\frac{d\text{Indigotina}}{dt} = 5.71218P \longrightarrow t = 0 \text{ (punto central)}$$

$$\frac{d\text{Indigotina}}{dP} = 5.71218t - 10.74836P \longrightarrow P = 0 \text{ (punto central)}$$

Es decir, los niveles de los factores a mantener en la tapa de oxigenación del proceso de extracción del colorante para que ésta sea óptima son:

- Presión: 32.4 Psi (en términos de flujo: 6.8 pie³/min)
- tiempo: 55.0 min

Para estas condiciones el contenido de indigotina es del 58.43%.

4.0 PROPUESTA DE DISEÑO PARA LA PLANTA DE EXTRACCIÓN DEL COLORANTE DE LA PLANTA DE AÑIL

Una vez fijados los parámetros a controlar en el proceso de extracción del colorante, se procedió a diseñar una Planta para la extracción del mismo.

Para tener un panorama amplio del sistema de extracción propuesto, la Fig. 4.1 muestra el Diagrama de Flujo de la secuencia de las operaciones unitarias adoptadas por la propuesta. A continuación se describen con detalle cada una de ellas, en base a la bibliografía consultada, a los resultados de las pruebas de laboratorio y consultas realizadas a especialistas en el campo de la Industria Química. Los detalles de los cálculos de diseño se muestran en el anexo H.

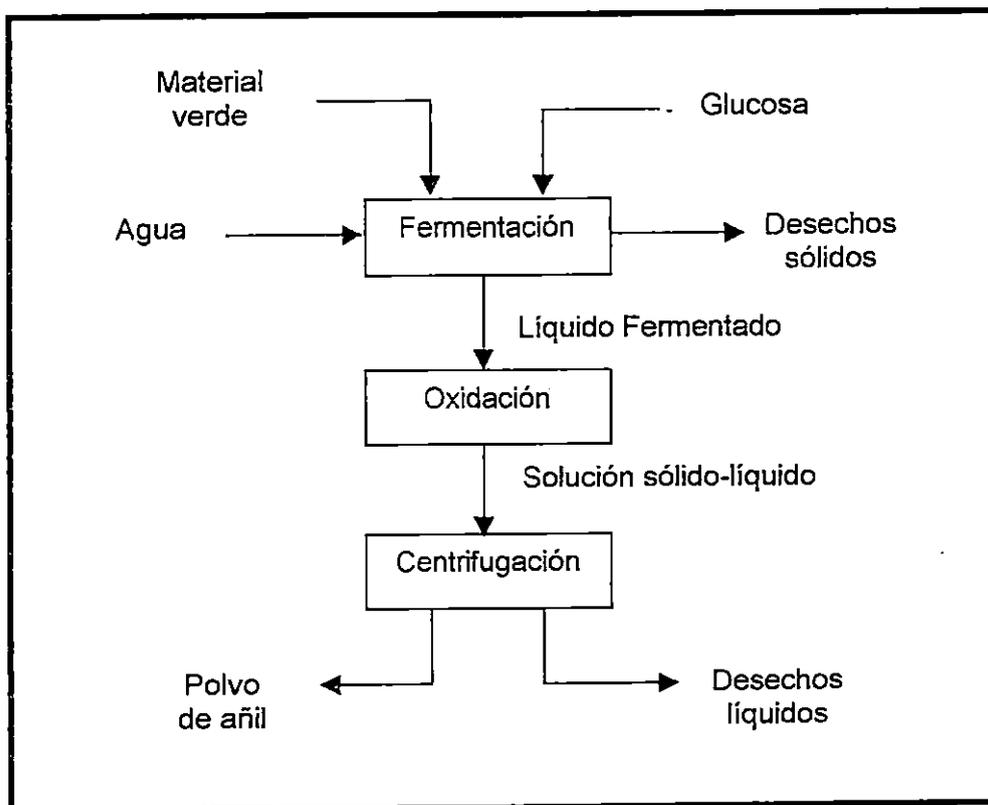


Fig. 4.1 Diagrama de Flujo del Sistema de Extracción Propuesto

4.1 Capacidad de Operación de la Planta

La capacidad de producción de la planta de extracción propuesta se ha considerado que será de 3 libras de polvo de añil, estimando que la planta puede trabajar 5 veces por semana durante un periodo total de producción de 6 meses, obteniendo con ello 360 libras de colorante por año.

4.2 Diseño del Tanque para la Fermentación

Se construirán tres tanques de fermentación con capacidad de producción de 1 libra de polvo de añil por unidad. Se ha estimado que el rendimiento del colorante por peso de hoja es de 1.6%, por lo tanto, para producir 1 libra de añil se necesitan 62.5 libras de hoja de añil. En el desarrollo experimental del presente trabajo se obtuvieron rendimientos de hoja en relación al peso de la planta de 45% en promedio, por lo que para obtener la cantidad de hoja mencionada, se necesitan 138.9 libras de planta.

62.5 libras de hoja ocupan un volumen de 35.5 litros ($\rho_{\text{hoja}}=1.76 \text{ lb/lt}$, Mongalo, 1978); para esto se requiere un volumen de agua de 567.5 litros (0.5675 m^3). El volumen total que se necesita es de 603 litros (0.603 m^3), tomando un factor de sobrediseño de 1.20 (Saade, 1984) el tanque deberá tener una capacidad de 723 litros (0.723 m^3).

Para facilitar la carga de hoja al tanque, se consideró fijar la altura del tanque en 1 metro.

Con el dato de altura y el volumen estimado, el diámetro calculado para el tanque es de aproximadamente 1 metro.

Tabla 4.1 Especificaciones del Tanque de Fermentación

| Descripción | Dimensiones |
|----------------------------------|--|
| Diámetro | 1.0 m |
| Altura | 1.0 m |
| Espesor | 1/8 plg. |
| Diámetro de Boquilla de Descarga | 1 plg. |
| Material de Construcción | Lámina ASTM A36 con recubrimiento de pintura anticorrosiva |

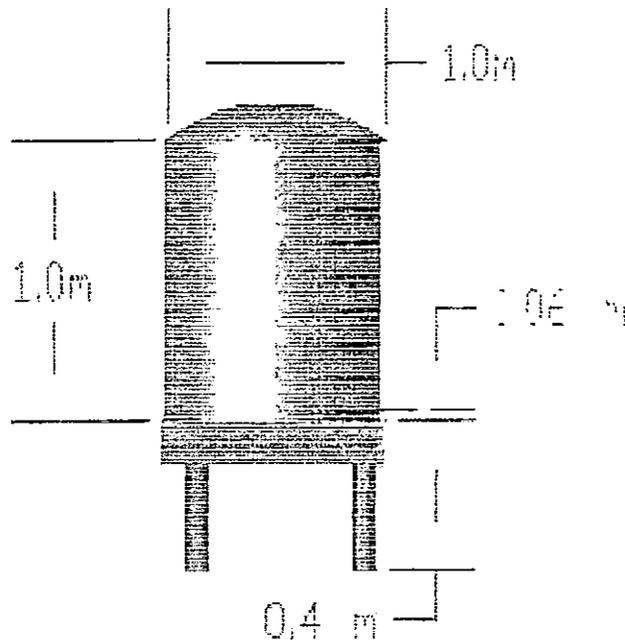


Fig. 4.2 Tanque para la Fermentación

4.3 Diseño del Tanque de Aireación

Este tanque recibirá el líquido procedente de cada uno de los tanques de fermentación, es decir, aproximadamente un volumen de líquido de $0.723 \text{ m}^3/\text{tanque}$.

En este tanque se inyectará aire a presión, mediante elementos difusores de tipo domo de 11.7 cm de diámetro (Fig. 4.4), los que originarán un flujo de aire hacia la superficie.

El número de difusores a instalar, según los requerimientos de aireación será de 40 unidades, los cuales estarán colocados sobre una cañería de PVC a una profundidad de 0.875 m, respecto a la altura del tanque.

Tabla 4.2 Especificaciones del Tanque de Aireación

| Descripción | Dimensiones |
|---|--|
| Diámetro | 1.1 m |
| Altura | 1.0 m |
| Espesor | 1/8 plg. |
| Diámetro de Boquilla de Descarga | 1 plg. |
| Número de difusores | 40 unidades |
| Diámetro del Difusor | 11.7 cm |
| Altura del Sistema de Difusores sobre el Fondo del Tanque | 0.125 m |
| Material de Construcción | Lámina ASTM A36 con recubrimiento de pintura anticorrosiva |

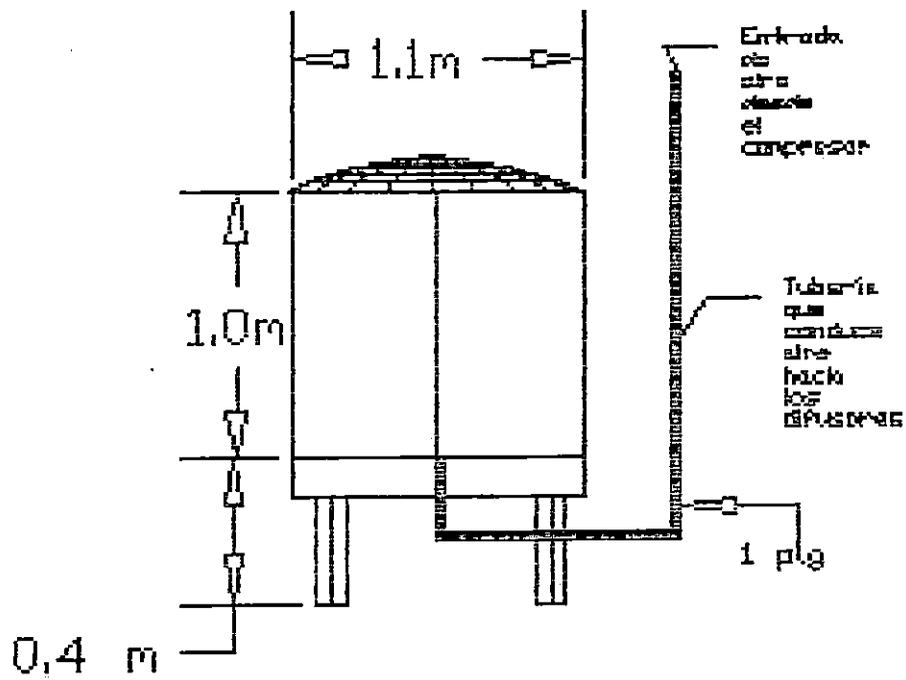


Fig. 4.3 Tanque de Aireación

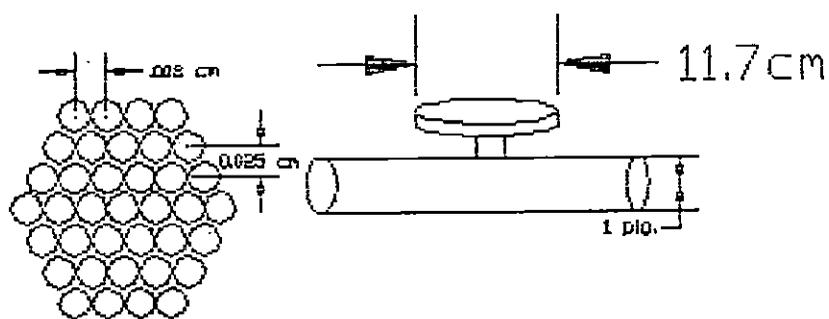


Fig. 4.4 Difusores

4.3.1 Compresor

El compresor será utilizado en la etapa de aireación con el objetivo de suministrar el aire necesario para oxidar el indoxil a indigotina.

Las especificaciones y parámetros de operación para el compresor, se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Especificaciones del Compresor

| Descripción | Especificaciones |
|--------------------|--|
| Número de unidades | 1 |
| Capacidad | 49.3 pie ³ /min |
| Presión | 100 Psi |
| Potencia | 15 HP |
| Modelo | BV 8900/500FT |
| Marca | ABAC |
| Material | Camisa: Hierro fundido Culata: Aluminio |

4.4 Etapa de Centrifugación

La necesidad de separar un sólido de un líquido está difundida por todas las industrias de proceso alrededor del mundo y un enorme rango de "separadores" han sido desarrollados para satisfacer esta necesidad.

El Tabla 4.4 da una sugerencia del amplio rango de técnicas utilizadas para efectuar una separación. El rango aplicable a la producción de añil está marcado dentro de una pequeña región sombreada, en la parte superior derecha del Tabla. Esta región

Como el nombre implica filtración centrífuga, opera con un filtro medio o una malla (usualmente una malla de acero inoxidable y una placa de metal conteniendo muchas ranuras finas o agujeros). El tamaño de las ranuras está dispuesto de tal manera que permita al líquido (agua) pasar, mientras los sólidos (polvo de añil) son retenidos.

La única manera de separar el polvo de añil del agua es por alguna forma de separación sólido-líquido. Las industrias de proceso hoy en día utilizan dos tipos de centrífugas de filtros, la centrífuga batch y la centrífuga cónica continua. Para este tipo de separación (polvo de añil-agua) se eligió una centrífuga batch por el tipo de operación de la planta propuesta (por lotes).

La Fig. 4.5 muestra un diagrama esquemático simple de una centrífuga batch. El primer elemento de la centrífuga es la canasta, la cual es un tambor de 20 pulgadas de diámetro y una profundidad de 12 pulgadas. La abertura de descarga en el fondo de la canasta se lleva a cabo con una válvula. La válvula es cerrada durante la alimentación y centrifugación, y abierta justo antes de que el polvo de añil sea descargado de la canasta. El mecanismo de descarga (normalmente llamado raspado) es operado en forma neumática y comprende una cuchilla de raspar, la cual puede ser presionada para raspar el polvo de añil hacia afuera de la pared de la canasta.

La canasta está atada a una barrena la cual se encuentra al centro del fondo de la canasta. La barrena se extiende desde el fondo de la canasta y está conectada a un motor eléctrico montado sobre la parte superior de la estructura que soporta la centrífuga. El tamaño del motor es de 5 HP. Un freno mecánico está montado bajo el motor y el montaje de rotación completo (canasta, barrena, freno y motor) está sostenido sobre cojinetes justo bajo el motor (ver Fig. 4.5). La tubería de alimentación a

la canasta es de 1 pulgada, las tuberías de lavado de ¼ pulgada, y posee sensores para detectar el nivel de solución sólido-líquido.

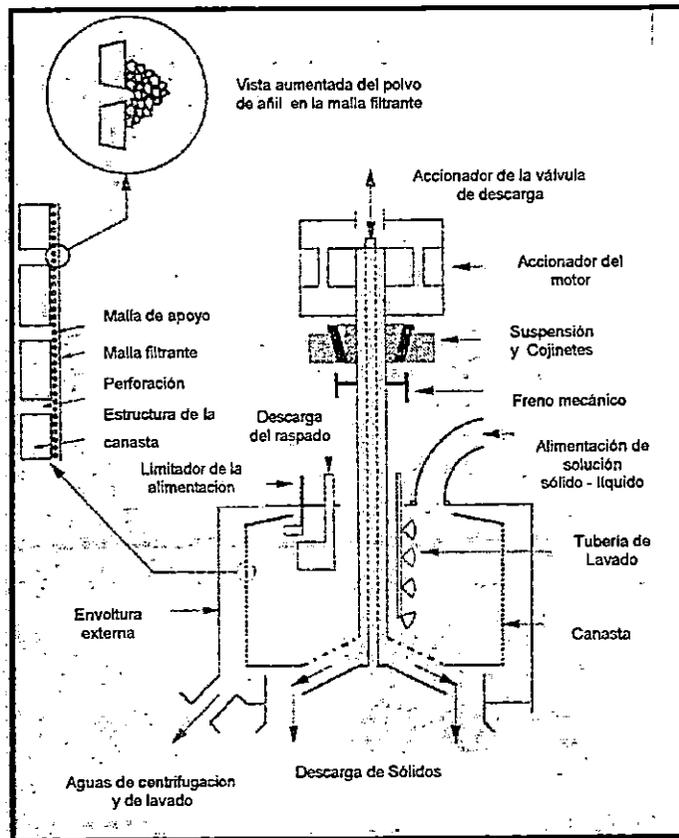


Fig. 4.5 Centrifuga Batch. Esquema Básico

La estructura perforada de la canasta actúa como un mecanismo de soporte para el polvo de añil dentro de la canasta. Entre la estructura de la canasta y el polvo de añil existe un par de mallas de metal. La malla interior es la malla filtrante a través de la cual la filtración centrífuga toma lugar. Esta contiene un gran número de finas ranuras o agujeros las cuales permiten que el líquido pase, siendo lo suficientemente pequeñas para retener el polvo de añil en la canasta. La malla interior o "malla de trabajo" esta hecha de acero inoxidable y los tamaños de las ranuras o agujeros son de aproximadamente igual o un poco menor al tamaño del polvo de añil (400 mesh).

Una malla de alambre de acero inoxidable ordinaria esta fijada entre la malla de trabajo y la estructura de la canasta. Su función es actuar como un espaciador que permita que el líquido el cual ha pasado a través de la malla de trabajo fluya una corta distancia a la perforación más cercana antes que escape hacia afuera.

La operación cíclica de la centrífuga batch es controlada por un control de programación lógico (PLC) el cual opera la centrífuga en un ciclo seleccionado según los requerimientos. El ciclo inicia con una canasta vacía a una velocidad de alimentación, el cual comprende los siguientes pasos:

- **Válvula de alimentación abierta.** La solución sólido-líquido fluye hacia la canasta.
- **Válvula de alimentación cerrada.** Un receptor de señales colocado en el límite de la alimentación muestra que la canasta está llena al nivel deseado y la válvula de alimentación se cierra. La canasta está ajustada para rotar a 150-250 rpm durante la alimentación y los tiempos típicos de alimentación son de 10-25 segundos.
- **Acelerar** la canasta a su máxima rapidez de centrifugación. Esta rapidez puede ser fijada por la frecuencia eléctrica suministrada o puede ser ajustada dependiendo del tipo de sistema impulsor en uso. La rapidez máxima es de 1600 para una canasta de 20 pulgadas. El tiempo de aceleración promedio se encuentra en la región de 40 segundos, dependiendo del tamaño de la canasta y de la velocidad máxima.
- **Lavado.** Durante la aceleración un lavado con agua es aplicado al polvo de añil, El lavado se aplica de 10 a 20 segundos y finaliza al final o cerca del punto en el cual la canasta alcanza la máxima rapidez de centrifugación.

- **Centrifugación.** Una velocidad máxima se mantiene para el tiempo de centrifugación escogido.
- **Desaceleración.** Después de que el tiempo de centrifugación se completa, la canasta es desacelerada a una velocidad de raspado (50-60 rpm). El método de desaceleración varía de acuerdo al sistema impulsor empleado.
- **Raspado.** Una vez que la canasta ha alcanzado la velocidad de raspado, la válvula de descarga es abierta y la cuchilla raspadora mecánica se mueve lentamente dentro del polvo de añil hasta la parte superior de la canasta. Una vez que la capa de polvo de añil ha sido penetrada completamente, la cuchilla raspadora es movida hacia abajo para cortar los remanentes de polvo de añil fuera de la canasta. El polvo de añil cae fuera de la válvula de descarga en el fondo de la canasta. El tiempo completo de la operación de raspado es de 20-30 segundos.
- **Aceleración/Lavado de la canasta.** Una vez que el raspado es completado la válvula de descarga se cierra y la canasta es acelerada a la velocidad de alimentación en alrededor de 10 segundos. Es normal lavar la pared de la canasta durante este periodo de aceleración para mantener una malla de trabajo limpia para el próximo batch. (No es necesario lavar siempre la malla cada ciclo).

La Fig. 4.6 muestra una vista seccional de la centrífuga batch. La tabla 4.5 presenta las Especificaciones de la Centrífuga a utilizar para separar el polvo de añil del agua.

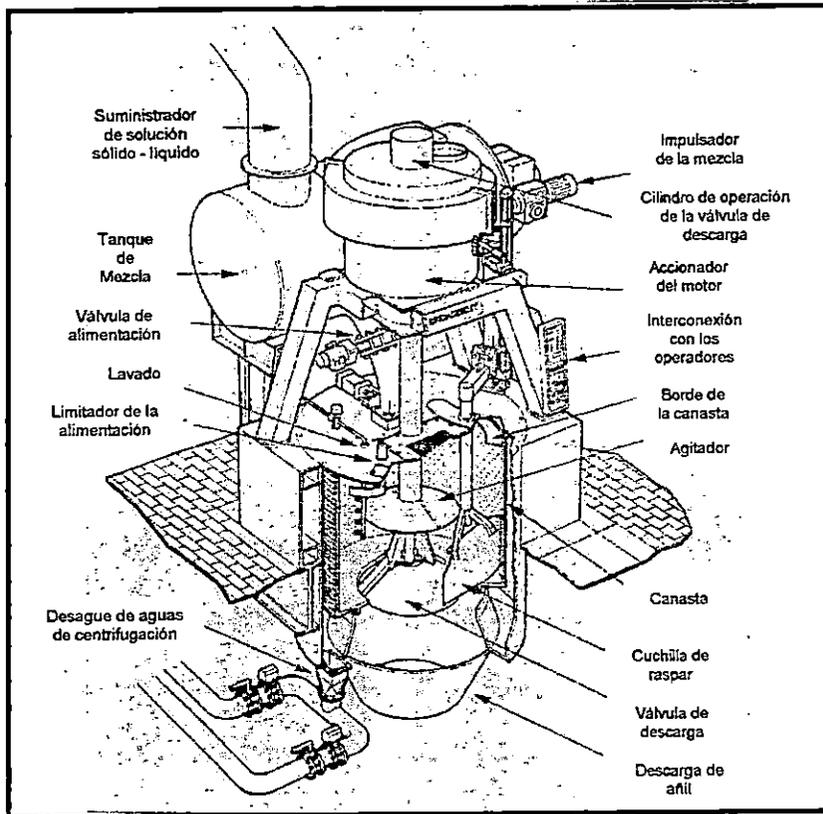


Fig. 4.6 Vista Seccional de la Centrifuga Batch

Tabla 4.5 Especificaciones de la Centrifuga

| Descripción | Especificación |
|------------------------|------------------|
| Marca | TOLHURST |
| Diámetro de Canasta | 20 plg. |
| Profundidad de Canasta | 12 plg. |
| Material | Acero Inoxidable |
| Velocidad | 1600 RPM |
| Motor | 5 HP |
| Mesh de la malla | 400 (BS/Tyler) |

4.5 Descripción del Proceso

Con el propósito de producir 360 libras de polvo de añil por año, se deberá procesar 50,004 libras (22.73 Ton) de planta de añil al año, es decir, 416.7 libras de planta de añil por día. Trabajando 6 días a la semana se producirán 15 libras de colorante, para lo cual se procesarán 15 batch en la semana con una capacidad por batch de 138.9 libras de planta. La planta debe acondicionarse previamente a la etapa de fermentación, para ello es necesario reducir su tamaño, por medio de una picadora de zacate (de ganadería).

Después de esta operación, se pesa el material verde y es colocado manualmente en el tanque de fermentación, adicionando a éste aproximadamente 0.43 libras de glucosa (calidad industrial), seguido de la incorporación de agua (potable). El llenado del tanque (volumen de agua necesario) se estima que se realiza en un tiempo aproximado de 15 a 20 minutos.

La etapa de fermentación tendrá una duración de 18 horas, y los lotes se pondrán en los tanques con una diferencia de 1 ½ hora entre sí, para esto se requiere contar con tres tanques de fermentación. Transcurrido este tiempo, el líquido se transfiere mediante una bomba, hacia el tanque de oxigenación, en un tiempo aproximado de 5 minutos, mientras que la planta de añil agotada (desechos) es retirada del tanque.

La etapa de oxidación tendrá una duración de 55 minutos, tiempo en el cual se inyectará aire por medio de un compresor, conectado a una serie de difusores, distribuidos de tal manera que se garantice una oxigenación uniforme del líquido, la inyección de aire se hará a una razón de 100.79 Kg de aire/minuto (Presión = 32.4 Psi).

El líquido oxidado pasa a la etapa de centrifugación, en donde la operación se lleva a cabo en una centrífuga batch, con una duración de 2.23 segundos/batch, operando a 1000 rpm. Los desechos líquidos son evacuados por la centrífuga para su posterior tratamiento.

La Fig. 4.7 muestra el Diseño de la Planta de Extracción Propuesta, en donde además de presentar el equipo anteriormente descrito, ilustra el sistema de conducción de flujo, formado por una tubería de 1 pulgada de diámetro de PVC, 8 codos de 90, 5 válvulas de globo, 14 pares de uniones y una bomba centrífuga de 0.5 HP.

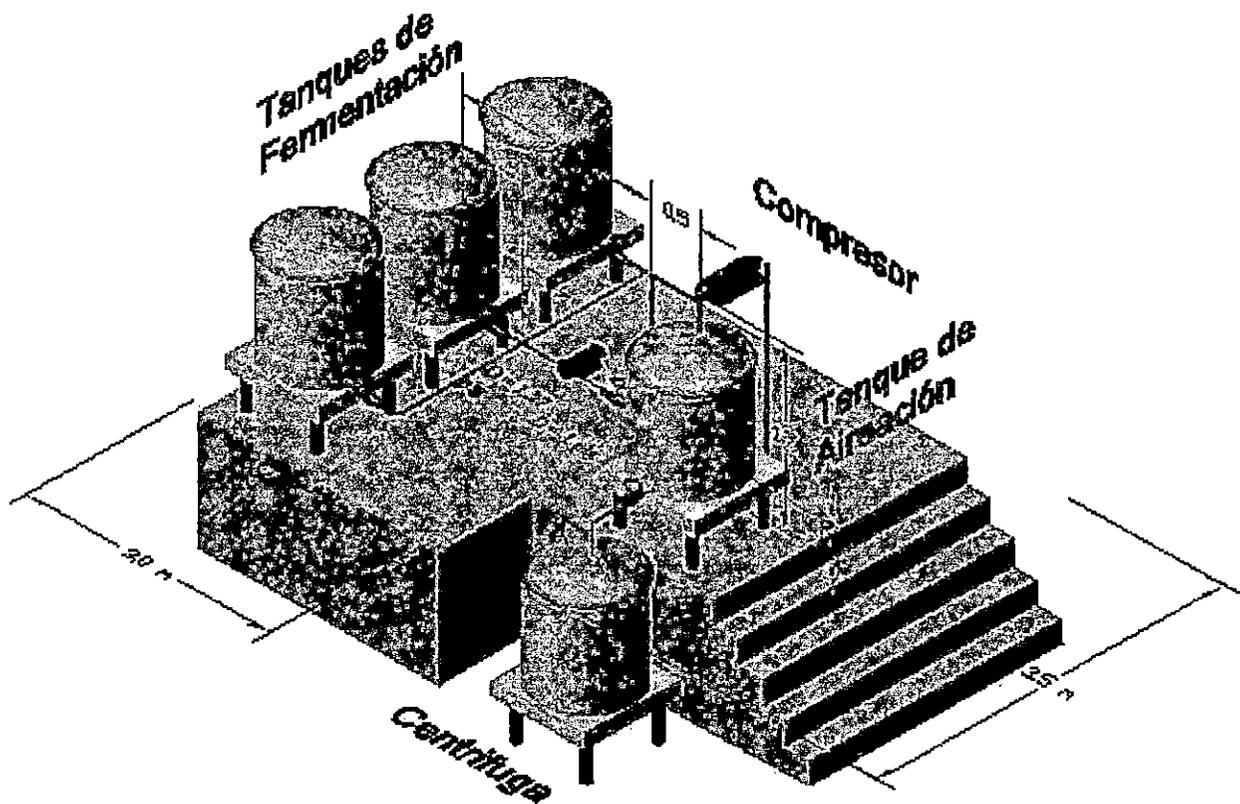


Fig. 4.7 Distribución de la Planta de Extracción Propuesta

La Fig. 4.8 presenta un diagrama de las instalaciones eléctricas necesarias para la planta de extracción propuesta, la cual incluye dos lámparas fluorescentes de 4 x 40W a 120V, necesarias para la iluminación de la misma y tres toma corriente doble a 120V; de los cuales uno de ellos está ubicado en el piso, al extremo derecho de la bomba y los dos restantes ubicados en las paredes laterales de la planta.

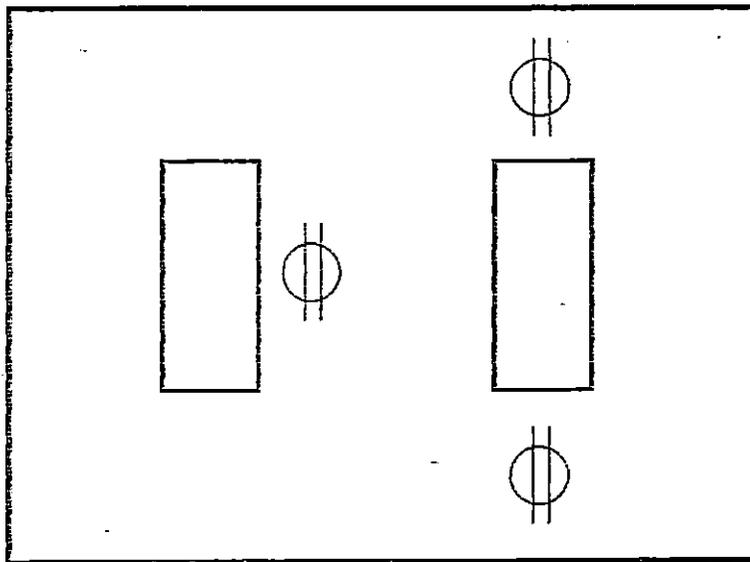


Fig. 4.8 Instalaciones Eléctricas



: Toma corriente doble a 120 V



: Lámpara fluorescente 4 x 40W a 120 V

5.0 IDENTIFICACIÓN DEL IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE GENERADOS POR EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL COLORANTE DE LA PLANTA DE AÑIL

Tomando en cuenta que cualquier industria independientemente de la actividad a la que se dedique, genera desechos, se considera necesario realizar un estudio en donde se identifique, caracterice y se plantee una posible gestión de los desechos que se generarán al poner en marcha la planta de extracción propuesta, con el objetivo de que cumpla con las normas vigentes requeridas por el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Con la elaboración del diagnóstico se pretende identificar la fuente de generación de residuos (sólidos y líquidos), la caracterización fisicoquímica de los mismos para determinar el tipo de sustancias presentes; y al final, con base al análisis realizado, se plantea la gestión de los desechos generados.

5.1 Identificación de los Desechos Generados

El proceso de extracción del colorante involucra diversas etapas, las cuales se presentan en la figura 4.1, tales etapas comprenden desde el corte de la planta de añil, hasta la obtención del colorante listo para su comercialización.

Para elaborar el diagnóstico de los efectos que los desechos generan en el proceso de extracción, se identificaron algunos de los materiales involucrados en cada etapa del proceso que son generadores de desechos. A continuación se describen estos materiales:

5.1.1 Desechos Líquidos

Durante el proceso de extracción del colorante, el agua es utilizada en la etapa de fermentación y desechada al final del proceso inmediatamente después de la etapa de centrifugación. Por lo que se genera agua de desecho de aproximadamente 0.6 m³/lote.

Por las características del proceso de extracción se analizaron los siguientes parámetros:

- Color
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Sólidos Sedimentables
- Sólidos Suspendidos
- Sulfatos
- Turbiedad

En la tabla 5.1 se presenta los resultados de laboratorio, los cuales se realizaron en los laboratorios de Especialidades Industriales S.A. de C.V. (ESPINSA, Anexo I).

Tabla 5.1 Resultados de Análisis Fisicoquímicos Realizados en Muestra de Agua Proveniente del Proceso de Extracción del Añil

| Tipo de Análisis | Resultados | Valor de la Norma | Excede N veces el valor de la Norma |
|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|--|
| Color | 7000 Pt-Co | 200 Pt-Co | 35 |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | 11,274.3 ± 297.7 mg/L | 400 mg/L | 28.19 |
| Sólidos Sedimentables | 0.1 mg/L | 1 mg/L | - |
| Sólidos Suspendidos | 324.3 ± 10.1 mg/L | 150 mg/L | 2.162 |
| Sulfatos | 137.9 ± 1.9 mg/L | 400 mg/L | - |
| Turbiedad | 262.5 NTU | 100 NTU | 2.625 |

De acuerdo a la caracterización fisicoquímica de los desechos líquidos (Tabla 5.1), los parámetros que se encuentran sobre los valores máximos permisibles para aguas residuales industriales descargadas a un cuerpo receptor, según la norma salvadoreña NSR 13.07.03.00 son:

- Color
- Turbiedad
- Demanda Química de Oxígeno
- Sólidos Suspendidos

5.1.2 Desechos Sólidos

La planta de añil agotada es el único desecho sólido que se genera durante el proceso de extracción proveniente de la etapa de fermentación.

El objetivo principal de caracterizar estos desechos es establecer el contenido de nitrógeno proteico, por la composición típica de la hoja del añil, información que se presenta en la Tabla 5.2 (Trabajo de Graduación de Alvarado de Funes, 1985), además de otros elementos de importancia; puesto que son los componentes que permiten determinar la posibilidad de que estos desechos sean utilizados como abono orgánico y/o forraje de animales.

Tabla 5.2 Resultados de los Análisis Efectuados en las Muestras de Hoja de la Planta de Añil (Anexo J)

| Macronutrientes (%) | | Micronutrientes (%) | |
|----------------------------|-------|----------------------------|------|
| Nitrógeno | 26.88 | Boro | 61.5 |
| Fósforo | 0.26 | Cobre | 28.7 |
| Calcio | 3.41 | Zinc | 32.5 |
| Magnesio | 0.545 | Manganeso | 1.40 |
| Azufre | 0.207 | | |

5.2 Propuesta de Gestión de los Desechos Generados

La gestión de los desechos sólidos y líquidos inicia con la identificación de las fuentes generadoras de los mismos, posteriormente su almacenamiento (si fuese necesario), para luego aplicar su respectivo tratamiento y disposición final.

La Fig. 5.1 muestra el Diagrama de Flujo de la secuencia a seguir para la Gestión de Desechos Sólidos y Líquidos.

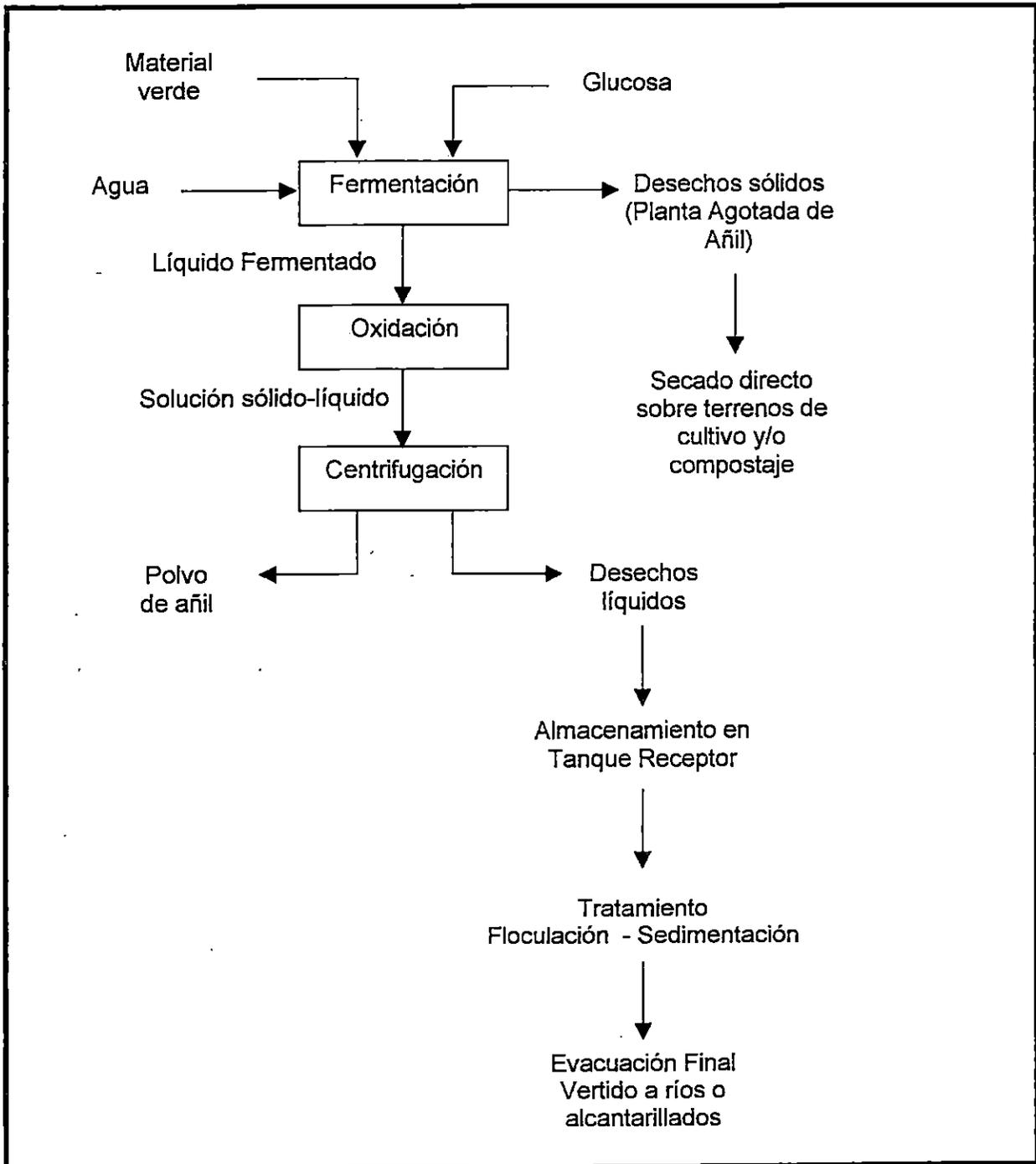


Fig. 5.1 Diagrama de Flujo de la Gestión de Desechos Sólidos y Líquidos

5.2.1 Gestión de Desechos Líquidos

El vertido directo a ríos, lagos, etc. de las aguas residuales del proceso de extracción del añil, provoca el desarrollo de depósitos de fangos debido a las altas concentraciones de sólidos suspendidos, lo cual aumenta las condiciones anaerobias de las zonas de vertido, y si se vierten en alcantarillados sanitarios provocarían un aumento y diversificación de la contaminación de las aguas domésticas aumentando la demanda de oxígeno.

Además, por las características propias del colorante, los sólidos suspendidos se encuentran relacionados a su vez, con el color y la turbiedad, ambos parámetros también presentes en las aguas con valores por encima de los máximos permisibles por las normas salvadoreñas (Tabla 5.1).

El valor de DBO fue estimado a partir de la relación $DBO/DQO = 0.6$ (Metcalf & Eddy), el cual resultó de 6,764.58 mg/L, excediendo en 33.82 veces el valor permitido por la norma (200 mg/L).

Para minimizar el impacto que el vertido directo de las aguas residuales podría ocasionar a los cuerpos receptores, es necesario establecer un sistema de tratamiento que esté de acorde a los requerimientos de las normas.

Los procesos que podrían aplicarse son del tipo químico, físico y/o biológicos.

Entre los sistemas de tratamientos recomendados para la eliminación de la mayoría de los sólidos en suspensión presentes en el agua residual se encuentran: la floculación seguido de una sedimentación.

A continuación se describe cada uno de los tratamientos:

Floculación

La floculación es la operación en que las partículas en suspensión aumentan su superficie de contacto. Este aumento de la superficie de contacto es debido a la adición de productos químicos en los procesos de precipitación química. Debido a la floculación, las partículas se agregan en partículas mayores (coagulación) y alcanzan la masa suficiente para sedimentar.

Sedimentación

La sedimentación es la separación de los componentes del agua en 2 fases, una fase sólida, que corresponde a los fangos y que está formada por partículas de sólidos suspendidos más pesados que el agua y que, por gravedad se depositan en el fondo, y una fase líquida formada por el agua y compuestos en disolución.

Existen diferentes productos químicos utilizados como agentes precipitantes, en nuestro caso se recomienda el uso de sulfato de aluminio, ya que éste reacciona con el agua en medio débilmente ácido, neutro o débilmente alcalino, produciendo hidróxido de aluminio insoluble, flóculo gelatinoso que, al sedimentar lentamente arrastra consigo a las partículas en suspensión. El hidróxido de aluminio recién precipitado tiene la importante propiedad de adsorber fuertemente ciertos colorantes orgánicos formando lo que se denominan lacas. Sin embargo, es necesario el estudio de pruebas de laboratorio para verificar que el reactivo químico sugerido es el adecuado y la dosificación óptima del mismo a usar en el proceso de clarificación del vertido.

Mediante la precipitación química puede obtenerse en agua casi exenta de sólidos en suspensión y en estado coloidal. En general se elimina del 80 al 90% de la materia total en suspensión, del 40 al 70% de la DBO, del 30 al 60% de DQO y del 80 al 90% de bacterias.

Para verificar que las aguas a verterse cumplan con las normas técnicas de calidad ambiental establecidas, es necesario realizar nuevos análisis de laboratorio post tratamiento, recomendando los análisis fisicoquímicos ya realizados en adición de un análisis microbiológico para verificar la necesidad de un tratamiento de desinfección.

Cuando se utiliza la floculación, se puede llevar a cabo en tanques independientes o tanques especialmente proyectados para tal fin, en tanques que combinan en una sola unidad las operaciones de floculación y la decantación primaria. La elección del tipo de tanque de sedimentación para la planta de tratamiento depende del tamaño de la instalación, de las disposiciones y reglamentos de los organismos locales de control, de las condiciones locales del terreno, de la experiencia y juicio del proyectista, y de la estimación de los costos.

Las Tablas 5.3 y 5.4 presentan información típica para el diseño de tanques de Floculación y Sedimentación respectivamente.

Tabla 5.3 Información Típica para Tanques de Floculación (Metcalf & Eddy, 1996)

| Características | Valor | |
|--|-------------|--------|
| | Intervalo | Típico |
| Tiempo de detección, min | 20 – 60 | 30 |
| Floculación Inducida por paletas, máxima velocidad periférica de la paleta, con reductor de velocidad hasta el 30% de la velocidad máxima, m/s | 0.45 – 1 | 0.60 |
| Floculación por Agitación por Aire, con difusores de tubo poroso, m ³ /10 ³ m ³ | 0.60 – 1.20 | 0.75 |

Tabla 5.4 Información Típica de los Tanques de Sedimentación Rectangulares y Circulares utilizados para el Tratamiento Primario de Agua Residual (Metcalf & Eddy, 1996)

| Tipo de Tanque | Valor | |
|------------------------------------|-------------|---------|
| | Intervalo | Típico |
| Rectangular: | | |
| Profundidad, m | 3 – 4.5 | 3.6 |
| Longitud, m | 15 – 90 | 25 – 40 |
| Anchura, m | 3 – 25 | 5 – 10 |
| Velocidad de los rascadores, m/min | 0.6 – 1.2 | 0.9 |
| Circular: | | |
| Profundidad, m | 3 – 4.5 | 3 – 6 |
| Diámetro, m | 3 – 60 | 12 – 45 |
| Pendiente de la Solera, m | 6.25 – 16 | 8 |
| Velocidad de los rascadores, m/min | 0.02 – 0.05 | 0.03 |

5.2.2 Gestión de Desechos Sólidos

Los desechos sólidos generados, no se consideran como fuente potencial de contaminación ambiental, ya que éstos pueden ser descargados directamente sobre los terrenos de cultivo tomando en cuenta que contienen un material biodegradable y de alto contenido de nitrógeno, por lo cual sería recomendable que a estos desechos se les diera un uso útil como se mencionó anteriormente, además de la posibilidad de transformarlo en abono orgánico y/o forraje para animales.

6.0 ANALISIS ECONOMICO DEL PROYECTO

Para llevar a cabo el análisis económico, es necesario contar con los siguientes datos: costos de equipo, inversión total de capital fijo, inversión total de capital y ganancias brutas por año. A partir de estos aspectos se calcula la rentabilidad (tasa de retorno) y el período de recuperación de capital.

La inversión total de capital fijo se ha calculado, considerando porcentajes sobre capital fijo para cada rubro de los costos directos e indirectos. Los porcentajes considerados para el cálculo de capital fijo, inversión total de capital y costos de producción, se han tomado según los datos recopilados por personas y empresas dedicadas al análisis económico de proyectos.

6.1 Determinación de la Inversión Total de Capital

Para llevar a cabo la determinación de la Inversión Total de Capital, es necesario contar con una serie de recursos, los cuales comprenden los requeridos para la adquisición e instalación de la infraestructura de la planta (Inversión Fija) y los requeridos para el funcionamiento de ésta (Capital de Trabajo).

6.1.1 Inversión de Capital Fijo

La inversión de capital fijo comprende la adquisición de todos los activos fijos o tangibles y diferidos o intangibles necesarios para iniciar las operaciones de la planta, con excepción del capital de trabajo.

Se entiende por activo tangible (que se puede tocar) o fijo, los bienes propiedad de la empresa, como terrenos, edificios, maquinaria, equipo y otros. Se le llama "fijo" porque la empresa no puede desprenderse fácilmente de él sin que con ello ocasione problemas a sus actividades productivas (Baca Urbina, 1995).

El activo tangible para este proyecto lo compone los siguientes rubros:

- Costo de Equipo
- Tuberías y Accesorios
- Edificaciones
- Terreno
- Facilidades de Servicio
- Gastos de Construcción

Se entiende por activo intangible el conjunto de bienes propiedad de la empresa necesarios para su funcionamiento, y que incluyen: gastos preoperativos y de instalación y puesta en marcha, contratos de servicios como luz, agua (Baca Urbina, 1995).

El activo intangible para este proyecto lo compone los siguientes rubros:

- Costo de Instalación del Equipo Adquirido
- Instalaciones Eléctricas
- Ingeniería y Supervisión
- Contingencias

6.1.1.1 Costos de Equipo

Comprende el costo de la maquinaria y equipo necesario para la función productiva de la planta, estos costos se han considerado en base a cotizaciones proporcionadas por el mercado, tanto nacional como internacional.

En la tabla 6.1 se presentan los costos por equipo para el presente año.

Según Peters (1980), el costo de adquisición del equipo representa el 65% de la inversión total de capital fijo.

La inversión de capital fijo asumida con el 65% es de ₡195,471.00; con ésta y los porcentajes que a continuación se describen, se determina el total de los rubros de la tabla 6.4.

Tabla 6.1 Costo por Equipo para el Año 2001

| Nº de Unidades | Nombre del Equipo | Costo de Adquisición (₡) | Referencia |
|----------------|------------------------|--------------------------|---|
| 3 | Tanque de Fermentación | 11,865.00 | Talleres Sarti S.A de C.V |
| 1 | Tanque de Oxidación | 4,000.00 | Talleres Sarti S.A de C.V |
| 1 | Centrífuga de Canasta | 87,500.00 | Louisiana Chemical Equipment Co., L. L. C. México |
| 1 | Compresor | 2,841.15 | Oxígeno y Gases de El Salvador, S.A de C.V |
| 1 | Bomba Centrífuga | 1,750.00 | Hidrosagarra S.A de C.V |
| 40 | Difusores Tipo Domo | 2,800.00 | Diffusser Express |
| 1 | Cortadora de Zacate | 13,000.00 | Maquiequipos S.A de C.V |
| 1 | Báscula | 3,300.00 | Básculas Cardinal Detecto |
| TOTAL | | 127,056.15 | |

6.1.1.2 Tuberías y Accesorios

El costo de las tuberías y accesorios de PVC, se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Costo de Tuberías y Accesorios

| Descripción | Precio Unitario (₡) | Costo (₡) |
|------------------|---------------------|---------------|
| Tubería (1 plg.) | 7.70/m | 86.24 |
| Válvulas | 45.00 | 225.00 |
| Codos (90) | 4.00 | 32.00 |
| Conexiones | 3.50 | 49.00 |
| TOTAL | | 392.24 |

* Referencia: Ferreterías Freund (2001)

Se considera que el gasto de instalación para tuberías es del 50% (del costo de tuberías, Peters, 1980) es decir, ₡196.12, este costo representa un 0.3% de la inversión de capital fijo.

6.1.1.3 Edificaciones (Incluyendo Servicios)

En este rubro se incluyen las instalaciones necesarias para el almacenamiento del producto, oficinas, áreas de proceso y todas las facilidades de servicios que sean necesarias en las instalaciones administrativas y de proceso. Se estima un 9% sobre la inversión de capital fijo (Peters, 1980), ₡17,592.39.

6.1.1.4 Terreno

Se considera que se comprará el terreno y que esa compra representa el 2.5% de la inversión de capital fijo, ₡4,886.78.

6.1.1.5 Facilidades de Servicio

En este aspecto se considera toda la infraestructura necesaria para tratamiento de desechos y equipo para el mismo fin. Se ha estimado un porcentaje de 5% para este rubro (Peters, 1980), ₡10,399.06.

6.1.1.6 Gastos de Construcción

Siempre que se construye algo, se incurre en gastos de operaciones y construcciones temporales, como herramientas para la construcción, etc., se considera un porcentaje del 0.7% de la inversión de capital fijo (Peters, 1980), ₡1,368.30.

6.1.1.7 Costos de Instalación del Equipo Adquirido

El costo de instalación se conoce para todo el equipo y en base al 65% asumido para el equipo adquirido se encuentra que la instalación del equipo representa el 8% de la inversión de capital fijo lo que equivale a ₡15,637.68.

6.1.1.8 Instalaciones Eléctricas

Este representa toda la infraestructura necesaria para las instalaciones eléctricas para el equipo, para el alumbrado del área de producción, y toda la instalación necesaria relacionada con el proceso. Se considera que este costo representa un 2% de la inversión de capital fijo, ₡3,909.42.

6.1.1.9 Ingeniería y Supervisión

Este aspecto considera los costos de diseño del proyecto, planos y otros costos de aspectos técnicos, como los gastos para la supervisión de toda la infraestructura de la planta, hasta que queda terminada y lista para operar. Este porcentaje se considera en un 4% de la inversión de capital fijo (Peters, 1980), ₡7,818.84.

6.1.1.10 Contingencias

Siempre es necesario considerar un porcentaje de dinero por cualquier contratiempo y una mala estimación en el diseño que haga que se necesite más inversión de la estipulada. Se considera que un 3.18% de la inversión de capital fijo es conveniente, para este aspecto, ₡ 6,214.02.

6.1.2 Capital de Trabajo

Desde el punto de vista práctico, está representado por el capital adicional con que hay que contar para que empiece a funcionar la planta, es decir, el capital con que hay que contar para empezar a trabajar (Baca Urbina, 1995).

6.1.2.1 Costo Directo

Son todos los rubros que intervienen directamente en la elaboración del producto. Para este proyecto los costos directos los representan la materia prima, mano de obra directa, costos de los insumos, costos de mantenimiento y cargo por depreciación.

a) *Materia Prima*

Son los materiales que de hecho entran y forman parte del producto terminado (Baca Urbina, 1995).

Se necesitan 50,004 libras de planta de añil para una producción anual de 360 libras de colorante. El costo de producción por libra de planta según la Asociación de Añileros de El Salvador (Anexo K) es de ₡0.146, por lo que 50,004 libras de planta costarían ₡7,300.58. Se necesitan 154.8 libras de glucosa, y el precio es de ₡27.67/lb (FALMAR, S.A. de C.V., 2001), lo que implica un gasto de ₡4,283.32 y además se requiere 205.2 m³ de agua para proceso, estos costos se estiman que son de ₡240.00. Haciendo un total de costos en materia prima de ₡11,823.90.

b) *Mano de Obra Directa*

Se estima que se necesita una persona para encargarse de cargar y descargar el follaje, abrir y cerrar válvulas de los tanques y programar la centrífuga. Se ha estimado que el salario para el operario será de ₡1,000.00 al mes.

c) Costos de Insumos

Excluyendo los rubros mencionados, todo proceso productivo requiere una serie de insumos para su funcionamiento. Estos pueden ser: energía eléctrica, agua potable, gastos de laboratorio para control de calidad, entre otros (Baca Urbina, 1995).

Se considera que el consumo de energía eléctrica será de $\$476.64$, debido a que la planta producirá únicamente durante 6 meses en el año, y el equipo eléctrico utilizado en el proceso no demanda mucho tiempo de funcionamiento, es decir que la mayor parte del tiempo estará fuera de servicio.

La cantidad asignada para el control de calidad del producto; $\$600.00$.

d) Costo de Mantenimiento

Se tiene que para este rubro el costo es de $\$500.00$, lo cual involucra, gastos en reparaciones mínimas y mantenimiento del equipo.

e) Cargos por Depreciación

Se ha estimado un 1.16 % de la inversión de capital fijo para el equipo, $\$1,473.85$.

6.1.2.2 Costos de Administración

Son como su nombre lo indica los costos provenientes de realizar la función de administración dentro de la empresa (Baca Urbina, 1995).

Para este proyecto se han estimado como gastos administrativos, el salario para un administrador de la planta, ₡1,000.00/mes, y los servicios externos de un contador, ₡150.00/mes.

La tabla 6.3 se muestra el presupuesto para el Capital de Trabajo necesario para el primer año de operación de la planta.

Tabla 6.3 Presupuesto para el Capital de Trabajo para el Primer Año de Operaciones

| Costos Directos | | | ₡20,874.39 | \$2,385.64 |
|----------------------------------|------------|------------|-------------------|-------------------|
| Materia Prima | ₡11,823.90 | \$1,351.30 | | |
| Mano de Obra Directa | ₡6,000.00 | \$685.71 | | |
| Costos de Insumos | ₡1,076.64 | \$123.04 | | |
| Costos de Mantenimiento | ₡500.00 | \$57.14 | | |
| Cargos por Depreciación | ₡1,473.85 | \$168.44 | | |
| Costos de Adeministración | | | ₡6,900.00 | \$788.57 |
| Administrador de la Planta | ₡6,000.00 | \$685.71 | | |
| Contador Externo | ₡900.00 | \$102.86 | | |
| Capital de Trabajo | | | ₡27,774.39 | \$3,174.22 |

* Tipo de Cambio (2001): \$1.00 = ₡8.75

En la tabla 6.4 se presenta la estimación de la inversión de capital fijo, de capital de trabajo e inversión total de capital.

Tabla 6.4 Inversión Total de Capital

| Activo Tangible | | | | |
|---|-------------|-------------|--------------------|--------------------|
| Costo de Equipo | ∅127,056.15 | \$14,520.70 | | |
| Tuberías y Accesorios | ∅588.36 | \$67.24 | | |
| Edificaciones | ∅17,592.39 | \$2,010.56 | | |
| Terreno | ∅4,886.78 | \$558.49 | | |
| Facilidades de Servicio | ∅10,399.06 | \$1,188.46 | | |
| Gastos de Construcción | ∅1,368.30 | \$156.38 | | |
| | | | ∅161,891.04 | \$18,501.83 |
| Activo Intangible | | | | |
| Costos de Instalación del Equipo | ∅15,637.68 | \$1,787.16 | | |
| Instalaciones Eléctricas | ∅3,909.42 | \$446.79 | | |
| Ingeniería y Supervisión | ∅7,818.94 | \$893.59 | | |
| Contingencias | ∅6,214.02 | \$710.17 | | |
| | | | ∅33,580.06 | \$3,837.72 |
| Inversión Total de Capital Fijo | | | ∅195,471.10 | \$2,23355 |
| Capital de Trabajo (12.44% de la Inversión Total de Capital) | | | ∅27,77439 | \$3,174.22 |
| Inversión total de Capital | | | ∅223,245.49 | \$25,51377 |

6.2 Financiamiento. Tabla de Pago de la Deuda

Una empresa esta financiada cuando ha pedido capital en préstamo para cubrir cualesquiera de sus necesidades económicas (Baca Urbina, 1995).

Debido a que la cantidad necesaria para la inversión es de ₡223,245.49 (\$25,513.77), se ha considerado a manera de sugerencia que el financiamiento del proyecto sea:

- 50% de Créditos
- 50% Fondos Propios

El financiamiento del proyecto se llevaría a cabo en la forma siguiente:

- Fondos Propios: ₡111,622.75 (\$12,756.89)
- Créditos: ₡111,622.75 (\$12,756.89)

6.2.1 Características del Crédito

La tabla 6.5 presenta las características del crédito sugerido para el financiamiento del proyecto.

Tabla 6.5 Características del Crédito

| | |
|------------------------|---|
| Cantidad Total | ₡111,622.75 (\$12,756.89) |
| Plazo | 7 años |
| Tasa de Interés | 16% (Banco Agrícola Comercial) |
| Forma de Pago | Pago de Cantidades iguales al final de cada uno de los 7 años |

Para efectuar el cálculo de la forma del plan de pagos, lo primero es determinar el monto de la cantidad igual que se pagará cada año. Para ello se emplea la fórmula:

$$A = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad \text{Ec. 4.8 (Baca Urbina, 1995)}$$

donde A (anualidad) es el pago igual que se hace cada fin de año. Sustituyendo valores:

$$A = 111,62.75 \left[\frac{0.16(1+0.16)^7}{(1+0.16)^7 - 1} \right]$$

$$A = 27,640.02$$

Con esto se construye la tabla de pago de la deuda para determinar que parte de A = 27,640.02 pagado cada año corresponde a capital e interés (véase la tabla 6.6).

Tabla 6.6 Tabla de Pago de la Deuda

| Año | Interés | Pago de Fin de Año (₡) | Pago a Principal (₡) | Deuda después del Pago (₡) |
|------------|----------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 0 | | | | 111,622.75 |
| 1 | 17,859.64 | 27,640.02 | 9,780.38 | 101,842.37 |
| 2 | 16,294.78 | 27,640.02 | 11,345.24 | 90,497.13 |
| 3 | 14,479.54 | 27,640.02 | 13,160.48 | 77,336.65 |
| 4 | 12,373.86 | 27,640.02 | 15,266.16 | 62,070.49 |
| 5 | 9,931.28 | 27,640.02 | 17,708.74 | 44,361.75 |
| 6 | 7,097.88 | 27,640.02 | 20,542.14 | 23,819.61 |
| 7 | 3,811.14 | 27,640.02 | 23,828.88 | 9.27 |

En la tabla 6.6 los intereses se obtienen multiplicando por 0.16, que es la tasa de interés cobrado, por la columna de deuda después de pago del año anterior, es decir, por el saldo insoluto o deuda no pagada. El pago de principal o de capital se obtiene restando a cada anualidad de ¢27,640.22 el pago de interés de ese mismo año (Baca Urbina, 1995).

6.3 Determinación de la Rentabilidad y Periodo de recuperación

En todo proyecto se hace necesario efectuar un análisis de factibilidad, para saber si este es o no rentable.

En la parte experimental se determinó que el máximo contenido de indigotina a obtener trabajando en condiciones óptimas de procesamiento, es de 58.43%.

En la Tabla 2.5, correspondiente a los Precios de Venta del Añil en el Mercado Europeo, a un contenido de indigotina del 60%, corresponde a un proceso de venta de \$41.00/Kg (\$162.70/lb). Por lo tanto, las ventas anuales serían de ¢58,572.00 (\$6,693.94).

La rentabilidad se obtiene dividiendo la utilidad, entre la inversión fija (Ecuación 25.1, Perry, 1992).

$$\%R = \frac{\textit{UtilidadAnual}}{\textit{InversióndeCapitalFijo}} * 100$$

$$\%R = \frac{(58,572.00 - 27,774.39)}{195,471.10} * 100$$

$$\%R = 15.76$$

Uno de los criterios tradicionales de evaluación de la Rentabilidad del proyecto, es el periodo de recuperación de la inversión, mediante el cual se determina el número de periodos necesarios para recuperar la inversión inicial.

El tiempo de recuperación de la inversión se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$P.R. = \frac{I_o}{B_N} \quad (\text{Ec. 16.25, Nassir Sapag Chain})$$

donde:

P.R. = Periodo de Recuperación

I_o = Inversión de Capital Fijo

B_N = Utilidad Bruta Annual

$$P.R. = \frac{195,471.10}{30,797.61}$$

$$P.R. = 6.35 \text{ años}$$

La inversión se recupera en 6 años 4 meses.

6.4 Determinación del Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Rendimiento (TIR)

Se sabe que el dinero disminuye su valor real con el paso del tiempo, a una tasa aproximadamente igual al nivel de inflación vigente. Esto implica que el método de análisis empleado para comprobar la rentabilidad económica del proyecto deberá tomar en cuenta este cambio de valor real del dinero a través del tiempo.

Los métodos de análisis que toman en cuenta este hecho son: El Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Rendimiento (TIR).

6.4.1 Valor Presente Neto (VPN)

Es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial (Baca Urbina, 1995).

Cuando se hacen cálculos de pasar, en forma equivalente, dinero del presente al futuro, se utiliza una “ i ” de interés o de crecimiento del dinero; pero cuando se quiere pasar cantidades futuras al presente, como en este caso, se usa una “tasa de descuento”, llamada así porque descuenta el valor del dinero en el futuro a su equivalente en el presente, y a los flujos traídos del tiempo cero se les llama flujos descontados.

La definición ya tiene sentido. Sumar los flujos descontados en el presente y restar la inversión inicial equivale a comparar todas las ganancias esperadas contra todos los desembolsos necesarios para producir esas ganancias, en términos de su valor equivalente en este momento o tiempo cero. Es claro que para aceptar un proyecto las

ganancias deberán ser mayores que los desembolsos, lo cual dará por resultado que el VPN sea mayor a cero. Para calcular el VPN se utiliza el costo de capital o tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR).

$$TMAR = i + f + i \times f \quad \text{Ec. 4.6 (Baca Urbina, 1995)}$$

donde:

i = Premio al riesgo

f = Inflación

Considerando el cálculo del VPN con flujos constantes sin financiamiento, la inflación se considera cero, entonces, la $TMAR = i$. Tomando un valor del premio al riesgo del 10% (Baca Urbina, 1995) la $TMAR$ calculada sería, 10%.

El cálculo del VPN es :

$$VPN = - P + FNE (P/A, TMAR, n) + VS (P/ F, TMAR, n) \quad \text{Ec. 5.4 (Baca Urbina, 1995)}$$

donde:

P = Inversión Inicial

FNE = Flujo Neto de Efectivo

VS = Valor de Salvamento

n = Periodo considerado

Para este proyecto :

- Inversión Inicial es: $P = 195,471.10$
- FNE del primer año son $A = 30,797.61$. Como permanecen constantes durante los cinco años se considera como una A (anualidad).
- El valor de salvamento es: $VS = 146,603.32$
- Periodo considerado: $n = 5$

Sustituyendo datos en la Ec. 5.4 :

$$VPN = -195,471.10 + 30,797.61 \times \left[\frac{(1 + 0.1)^5 - 1}{0.1(1 + 0.1)^5} \right] + \frac{146,603.32}{(1 + 0.1)^5} = 12,305.20$$

$$VPN = 12,305.20$$

Como se obtiene un valor de VPN mayor que cero; por tanto, se acepta el proyecto.

6.4.2 Tasa Interna de Rendimiento (TIR)

Es la tasa de descuento que hace que el VPN sea igual a cero . Es claro que si el VPN es igual a cero solo se estará ganando la tasa de descuento aplicada, o sea la TMAR, y un proyecto deberá aceptarse con este criterio ya que se esta ganando lo mínimo fijado como rendimiento, (Baca Urbina, 1995).

Según la definición de TIR, su cálculo puede expresarse como:

$$P = A (P/A, i, n) + VS (P/F, i, n) \quad \text{Ec. 5.6 (Baca Urbina, 1995)}$$

Esto equivale a :

$$P = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] + \frac{VS}{(1+i)^n} \quad \text{Ec. 5.7 (Baca Urbina, 1995)}$$

Aplicando los datos en la ecuación 5.7 se tiene :

$$195,471.10 = 30,797.61 \left[\frac{(1+i)^5 - 1}{i(1+i)^5} \right] + \frac{146,603.32}{(1+i)^5}$$

la " i " que satisface la ecuación anterior es: **11.81%**; que equivale a la TIR del proyecto que considera FNE constantes.

Ya que la **TIR = 11.81%** es mayor que la **TMAR = 10%**, se acepta el proyecto.

OBSERVACIONES

- Durante el desarrollo de la etapa experimental del proyecto, pudo observarse que tanto el tamaño como el estado de madurez de la planta influyen significativamente en la calidad de indigotina obtenida.
- Es de hacer notar que el uso de un compresor en la etapa de oxigenación además de aumentar la superficie de contacto sólido-líquido aumenta la cantidad y calidad del colorante extraído.
- La etapa de centrifugación en el desarrollo experimental siempre fue necesaria, debido a que durante la sedimentación no se lograba una separación completa del colorante.
- La malla de trabajo a utilizar en la centrífuga es de 400 mesh (BS/Tyler), según pruebas de tamizado realizadas al colorante en el Laboratorio de Materiales y Suelos de la Escuela de Ingeniería Civil de esta Universidad.

CONCLUSIONES

- Los factores más significativos en el proceso de extracción del colorante de la planta de añil y sus niveles óptimos son:
 - Relación hoja:masa de agua: 1:20
 - Tipo de hoja: fresca
 - Glucosa: 5% en relación al tamaño de la muestra
 - Oxigenación: P = 32.4 Psi

Tiempo = 55 min

Para estas condiciones el contenido de indigotina estimado es de 58.43%.

- Trabajando con las condiciones óptimas de extracción, el tiempo fijado para la etapa de fermentación fué de 18 horas.
- El rendimiento de añil en promedio fué de 1.6 gr de colorante por 100 gr de hoja utilizada.
- El diseño de la planta propuesta para la extracción del colorante reduce significativamente los tiempos actuales de procesamiento (de 5-6 días a 20 horas), además de aumentar el rendimiento en polvo (de 0.5% a 1.6%) y su contenido de indigotina (de 20-35% a 58.43%).

- No se realizaron los análisis respectivos a los desechos sólidos generados en el proceso, por tal motivo la información al respecto fue tomada del Trabajo de Graduación de Alvarado de Funes (1987).
- Para saber si el diseño de la planta de extracción propuesta es rentable o no, se determinó la rentabilidad ($\%R=15.76$) y periodo de recuperación (P.R.= 6 años 4 meses) además del valor presente neto (VPN=12,305.20) y la tasa interna de rendimiento (TIR=11.81%); las cuales demostraron que el proyecto es económicamente rentable.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un estudio agronómico de la planta de añil con el objetivo de establecer el cuidado, manejo y tiempo de corte de la misma; además de evaluar la posibilidad de sembrar otras especies diferentes a las que existen en nuestro país..
- Se recomienda realizar estudios para verificar tiempos y condiciones óptimas de secado de la planta, ya que ésta puede ser una opción para no perder la producción en caso de que no se alcance a procesar en el tiempo en que la planta presenta su máximo contenido de colorante.
- Aunque se obtuvieron buenos resultados al fijar el tiempo de fermentación en 18 horas, es necesario continuar investigando dicha etapa con el objetivo de establecer el tiempo óptimo de la misma.
- Para facilitar la descarga del desecho sólido dentro del diseño de la planta propuesta, se recomienda utilizar un cedazo de un material apropiado (preferentemente plástico) dispuesto en el tanque de fermentación en forma de canasta.
- Las condiciones óptimas evaluadas, se llevaron a cabo con el uso de agua potable; por lo que es recomendable realizarle un análisis fisicoquímico (conductividad, pH, sólidos totales disueltos, temperatura, alcalinidad total como CaCO_3 , calcio, cloruros, dureza total como CaCO_3 , hierro total, magnesio, manganeso, sílice, sodio y sulfatos), con el objetivo de que en futuras pruebas que

se lleven a cabo, se realicen análisis con este mismo perfil a las aguas que se van a utilizar en el proceso.

- Se recomienda el estudio de la adición de algún tipo de coagulante que facilite la precipitación del colorante; pero que no influya en su calidad, con ello podría evitarse el uso de la centrifuga.

- Además de los análisis fisicoquímicos realizados a las aguas de desecho del proceso, fueron analizadas las aguas de desecho proveniente del análisis de indigotina (Anexo L), las cuales presentan un alto grado de contaminación. De realizarse el control de calidad dentro de las instalaciones de la planta de extracción propuesta, se recomienda darle un tratamiento adecuado para su posterior vertido.

REFERENCIAS

- Thorp, F. Hall, **"Química Industrial"**, Segunda Edición, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona.
- Dr. Ullmann, Fritz, (1953), **"Enciclopedia de Q"**, Segunda Edición, Tomo XIII, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona.
- García Rivera, Francisco A, Junio, (1996), **"Estudio sobre Agronomía del Jiquilite Indigofera sp. y procesamiento del Añil en Chalatenango"**. IICA Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. ADEL Chalatenango.
- Montenegro, T., (1981), **"Aspectos Agroeconómicos del Jiquilite o añil en El Salvador"**, CENTA, Boletín Divulgativo 5-81, San Andrés.
- Araniva de González, Ana E., Abril-Junio, (1992), **"El Añil"**, Revista Pankia, Boletín informativo.
- Kuques, Victor M., Noviembre, (1997), **"El añil en el Sur del Istmo Oaxaqueño"**, Tesis Profesional para obtener el título de Ingeniero en Agroecología; Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Rubio Sánchez, Manuel, (1976), **"Historial del Añil o Xiquilite en Centro América"**, Primera Edición, Dirección de Publicaciones del Ministerio de Educación, San Salvador, El Salvador.

- Miller, D. (1984), **"From Seed to Dye"**, Craeston-Bennett, Cuarta Impresión, Santa Cruz, CA. E.U.A.
- Montgomery, Douglas C. (1991), **"Diseño y Análisis de Experimentos"**, Grupo Editorial Iberoamérica S.A. de C.V., México.
- Hideo Kojima, **"Apuntes sobre el añil o Indigo. Principalmente de Guatemala y otras regiones de Centroamérica"**, Traducción al español por Keiko Kojima.
- Jenny Balfour-Paul, **"Indigo"**, First published in the United States of America in 2000 by Fitzroy Dearborn Publishers, Chicago, Illinois.
- Goto, Shoichi, (1974), **"Indo-Ai Kōbō Shō-shi"**, Senshoku to Seikatsu, No.6, Senshoku to Seikatsu-sha, Tokyo.
- Standley, Paul C. & Williams, Louis O., (1930), **"Flora of Yucatan"**, Field Museum of Natural History, Chicago.
- Standley, Paul C. & Williams, Louis O., (1961), **"Flora of Guatemala"**, (Fieldiana; Botany), Chicago Natural History Museum, Chicago.
- Landa, Diego de, (1966), **"Relación de las cosas de Yucatán"**, Editorial Porrúa, S.A., México.
- Ciudad Real, Antonio de, (1976), **"Tratado curioso y docto de las grandezas de la Nueva España"**, I y II, UNAM, México.

- Sahagún, Bernardino de, (1969), “Historia General de las Cosas de Nueva España”, 4 tomos, Editorial Porrú, S.A., México.
- Cordry, Donald & Dorothy, (1968), “Mexican Indian Costumes”, University of Texas Press, Austin.
- Vásquez de Espinoza, Fray Antonio, (1948), “Compendio y Descripción de las Indias Occidentales”, Smithsonian Institution, Washington, D.C.
- Gage, Thomas, (1946), “Los Viajes de Thomas Gage en la Nueva España”, Sociedad de Geografía e Historia de Guatemala, Guatemala.
- Minakami, Kikuhito, (1976), “Tennen-senryo to Jinzo-Senryo (Tintas Naturales y Tintas Artificiales)”, Senshoku to Seikatsu, No.13, Senshoku to Seikatsu-Sha, Tokyo.
- Dr. Constantino Alvarez Fúster, (1995), “Diseño de Equipo, Tanques y Recipientes”, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Segunda Edición, México.
- Munguía, Núñez, Sánchez, (2001), “Diseño, Construcción y Operación de un Reactor Tubular a Escala de Laboratorio, para ser utilizado en los Laboratorios de la Planta Piloto de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador”, Trabajo de Graduación para Optar al Título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Química.

- Nassir y Reinaldo Sapag Chain, (1995), **“Preparación y Evaluación de Proyectos”**, McGraw-Hill Interamericana, S.A., Tercera Edición, Santafé de Bogotá, D.C., Colombia.
- Gabriel Baca Urbina, (1995), **“Evaluación de Proyectos”**, McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V., Tercera Edición.
- Peters & Timmerhaus, (1980), **“Plant Design and Economics for Chemical Engineers”**, Mc Graw-Hill Inc., Second Edition.
- Ramón Sans Fonfría/Joan de Pablo Ribas, (1999), **“Ingeniería Ambiental. Contaminación y Tratamientos”**, ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V., México, D.F.
- Metcalf & Eddy, (1996), **“Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización”**, Mc Graw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., Tomo 1 y 2.
- Perfil Grupo Añil. Asociación de Añileros de El Salvador, (Julio 2001), **“Manual del Cultivo y Procesamiento de Añil”**, Proyecto Agroindustrial/GTZ.

ANEXOS

ANEXO A

DISEÑO Y ANALISIS DE EXPERIMENTOS

A-1 Diseño Experimental

Los investigadores realizan experimentos virtualmente en todos los campos del saber, por lo general para descubrir algo acerca de un proceso o sistema en particular. Literalmente, un experimento es una *prueba* o ensayo. Un *experimento diseñado* es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

El proceso o sistema bajo estudio puede representarse por medio del modelo de la fig. A-1. Suele ser posible visualizar el proceso como una combinación de máquinas, métodos, personas y otros recursos que transforman alguna entrada (a menudo un material) en una salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas de las variables del proceso x_1, x_2, \dots, x_p son controlables, mientras que otras z_1, z_2, \dots, z_q son incontrolables (aunque pueden ser controlables para los fines de una prueba). Entre los objetivos del experimento pueden incluirse:

1. Determinar cuáles variables tienen mayor influencia en la respuesta, y .
2. Determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que y tenga casi siempre un valor cercano al valor nominal deseado.

3. Determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que la variabilidad de y sea pequeña.
4. Determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que se minimicen los efectos de las variables incontrolables z_1, z_2, \dots, z_q .

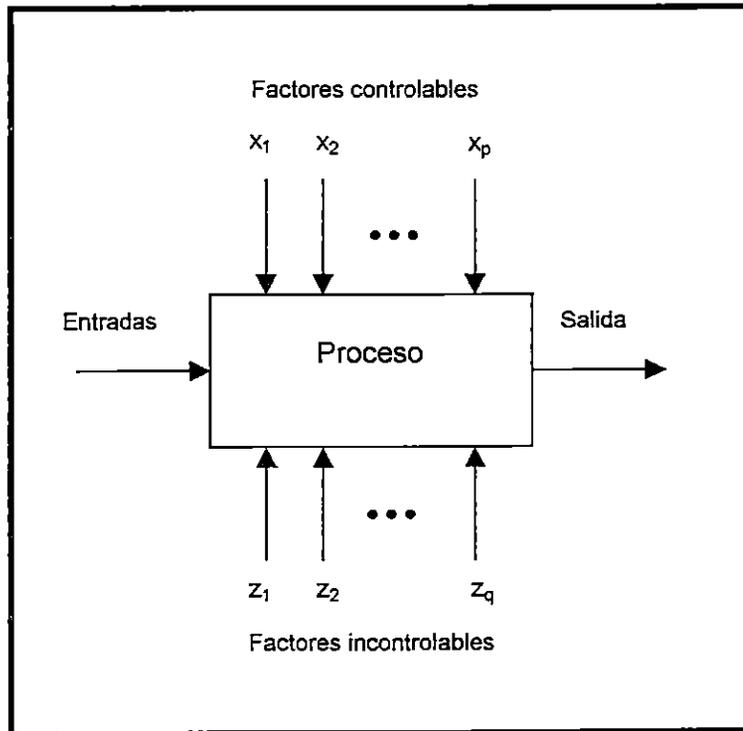


Fig. A-1. Modelo general de un proceso o sistema

A-2 Introducción a los Diseños Factoriales

Muchos experimentos se llevan a cabo para estudiar los efectos producidos por dos o más factores. Puede mostrarse que en general los diseños *factoriales* son los más eficientes para este tipo de experimentos. Por diseño factorial se entiende aquel en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento.

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producida por un cambio en el nivel del factor. Con frecuencia, éste se conoce como *efecto principal* porque se refiere a los factores de interés primordial del experimento.

A-3 Diseño Factorial 2^k

Los diseños factoriales son ampliamente utilizados en experimentos en los que intervienen varios factores para estudiar el efecto conjunto de éstos sobre una respuesta. Existen varios casos especiales del diseño factorial general que resultan importantes porque se usan ampliamente en trabajos de investigación, y porque constituyen la base para otros diseños de gran valor práctico.

El más importante de estos casos especiales ocurre cuando se tienen k factores, cada uno con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos como sería el caso de dos valores de temperatura, presión o tiempo. También pueden ser cualitativos como sería el caso de dos máquinas, dos operadores, los niveles "superior" e "inferior" de un factor o, quizás, la ausencia o presencia de un factor. Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se conoce como diseño factorial 2^k .

El diseño 2^k es particularmente útil en las primeras fases del trabajo experimental, cuando es probable que haya muchos factores por investigar. Conlleva el menor número de corridas con las cuales pueden estudiarse k factores en un diseño factorial completo. Debido a que sólo hay dos niveles para cada factor, debe suponerse que la respuesta es aproximadamente lineal en el intervalo de los niveles elegidos de los factores.

Los planes factoriales 2^k tienen aplicación en la industria. Su diseño permite la estimación separada de los efectos individuales y de interacción de k factores en un programa experimental en el cual los k factores varíen simultáneamente según un plan de ensayos cuidadosamente organizado.

Para identificar los ensayos individuales se utilizan diferentes notaciones, que se muestran en la Tabla A-1. Una de ellas indica cada factor mediante una letra (o número) y luego señala los dos niveles (versiones) de cada factor con el signo más (+) y con el signo menos (-). Habitualmente, el signo menos se refiere al nivel inferior, a la condición estándar o a la ausencia del factor. La notación (+,-) a veces se denomina "geométrica". Las notaciones alternativas emplean 0 y 1, respectivamente, o siguiendo la original tradición japonesa establecida por Taguchi, 1 y 2, para las dos versiones de cada factor.

Tabla A-1 Diferentes Notaciones para el Diseño Factorial 2^3

| Ensayo núm. | Notación geométrica | | | Notación Alternativa | | | Notación japonesa | | | Notación clásica | | |
|----------------|------------------------|---|---|-------------------------|---|---|----------------------|---|---|---------------------|---|-----|
| | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| 1 | - | - | - | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | | | 1 |
| 2 | + | - | - | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | | | a |
| 3 | - | + | - | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | | | b |
| 4 | + | + | - | 1 | 1 | 0 | 2 | 2 | 1 | | | ab |
| 5 | - | - | + | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | | | c |
| 6 | + | - | + | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | | | ac |
| 7 | - | + | + | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | | | bc |
| 8 | + | + | + | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | | | abc |

A-4 Diseños Factoriales Fraccionarios de Dos Niveles

A medida que el número de factores en un diseño factorial 2^k aumenta, el número de ensayos necesarios para obtener una réplica completa sobrepasa rápidamente los recursos de la mayoría de los experimentadores. Una réplica completa de un diseño 2^6 requiere 64 ensayos. En este diseño sólo 6 de los 63 grados de libertad corresponden a los efectos principales, y únicamente 15 corresponden a las interacciones de dos factores. Los 42 restantes corresponden a las interacciones de tres o más factores.

Si el experimentador puede suponer razonablemente que algunas interacciones de orden superior son despreciables, la información sobre los efectos principales y las interacciones de menor orden puede obtenerse realizando sólo una fracción del experimento factorial completo. Estos diseños *factoriales fraccionarios* se encuentran entre los tipos más ampliamente usados para el diseño de productos y procesos y para la detección y solución de problemas.

Un uso importante de los factoriales fraccionarios se da en los *experimentos de escrutinio*, también llamados de tamizado o cribado. Estos son experimentos en los cuales se consideran muchos factores con el fin de identificar aquellos que tienen efectos importantes, de haberlos. Los experimentos de escrutinio suelen realizarse en las primeras fases de un proyecto cuando es probable que muchos de los factores inicialmente considerados tengan poco o ningún efecto sobre la respuesta. Los factores que se identifican como importantes se investigan entonces con mayor detalle en experimentos posteriores.

A-4.1 Diseño Factorial Fraccionario 2^{k-p} General

Un diseño factorial fraccionario 2^k que contiene 2^{k-p} ensayos se conoce como fracción $1/2^p$ del diseño factorial 2^k , o simplemente diseño factorial fraccionario 2^{k-p} . Estos diseños requieren que se elijan p generadoras independientes. La relación que define estos diseños consta de las p generadoras originalmente elegidas y de sus $2^p - p - 1$ interacciones generalizadas.

La estructura de los alias puede determinarse multiplicando cada efecto, por la relación que define al diseño. Se debe tener cuidado al elegir las generadoras para que los efectos de interés potencial no sean alias entre sí. Cada efecto tiene $2^p - 1$ alias. Por lo regular, se suponen despreciables las interacciones de orden superior (las de tercero, cuarto o mayor orden) cuando los valores de k son moderadamente grandes. Esto simplifica mucho la estructura de los alias.

Es importante que las p generadoras para un diseño factorial fraccionario 2^{k-p} se elijan de tal modo que se obtengan las mejores relaciones de alias posibles. Un criterio razonable es elegir generadores tales que el diseño 2^{k-p} resultante tenga la máxima resolución de diseño posible.

A-4.2 Análisis de Factoriales Fraccionarios 2^{k-p}

El diseño factorial fraccionario 2^{k-p} puede analizarse graficando las estimaciones de los efectos de los factores sobre la variable respuesta mediante un gráfico de probabilidad

normal y/o analizando los efectos principales y de sus interacciones a través de un Diagrama de Pareto.

Un efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producida por un cambio en el nivel del factor.

En general, la estimación de los efectos de los factores se lleva a cabo como sigue:

Consideremos los datos de la Tabla A-2:

Tabla A-2 Diseño de un Plan Factorial Fraccional

| Corrida | Diseño básico | | | Observación |
|-------------------|---------------|------|-------|-------------|
| | A | B | AB | |
| 1 | - | - | + | 4.2 |
| 2 | + | - | - | 3.1 |
| 3 | - | + | - | 4.5 |
| 4 | + | + | + | 2.9 |
| Estimación | -1.35 | 0.05 | -0.25 | |

Cada efecto estimado es un estadístico de la forma $\bar{y}_+ - \bar{y}_-$, donde, los subíndices más y menos de cada letra identifican las observaciones que entran en cada promedio.

La cuestión de que observaciones entran en que media de cada efecto estimado es contestada a partir de las k columnas de signos + y - que, juntas, forman el diseño experimental (los "vectores" columna del diseño). Vectores columna adicionales, de signo + y - se construyen luego para cada interacción, como se ilustra en la Tabla A-2. Por

ejemplo, el vector de signos AB se obtiene multiplicando algebraicamente, en cada fila, el signo + o - de la columna A por el signo + o - de la columna B.

La Tabla A-2 contiene también una columna de observaciones. Para estimar el efecto de interacción AB, todas las observaciones que llevan el signo + en la columna AB son situadas en \bar{y}_+ , y las que llevan el signo - en \bar{y}_- . El efecto de interacción estimado AB, es decir, el valor de $(\bar{y}_+ - \bar{y}_-)$, será pues:

$$\frac{4.2 + 2.9}{2} - \frac{3.1 + 4.5}{2} = \frac{7.1}{2} - \frac{7.6}{2} = \frac{-0.5}{2} = -0.25$$

Para poder construir el gráfico de probabilidad normal, deben disponerse las estimaciones de los efectos en orden descendente y graficar la j-ésima de estas estimaciones ordenadas contra su punto de probabilidad acumulada $P_j = (j-1/2)/N$. En la Tabla A-3 las estimaciones se organizan en orden descendente y se calculan sus puntos de probabilidad acumulada P_j .

Tabla A-3 Estimaciones ordenadas y puntos de probabilidad

| Orden (j) | Efecto | Estimación | $(j-0.5)/3$ |
|-----------|--------|------------|-------------|
| 3 | A | 0.05 | 0.83 |
| 2 | B | -0.25 | 0.5 |
| 1 | AB | -1.35 | 0.17 |

En la fig. A-2 se presenta la gráfica de probabilidad normal con las estimaciones graficadas contra $P_j \times 100$ en la escala vertical izquierda. Todos los efectos que se ubican en la línea son despreciables, mientras que los efectos grandes están alejados de ésta y por lo tanto son éstos los efectos realmente significativos.

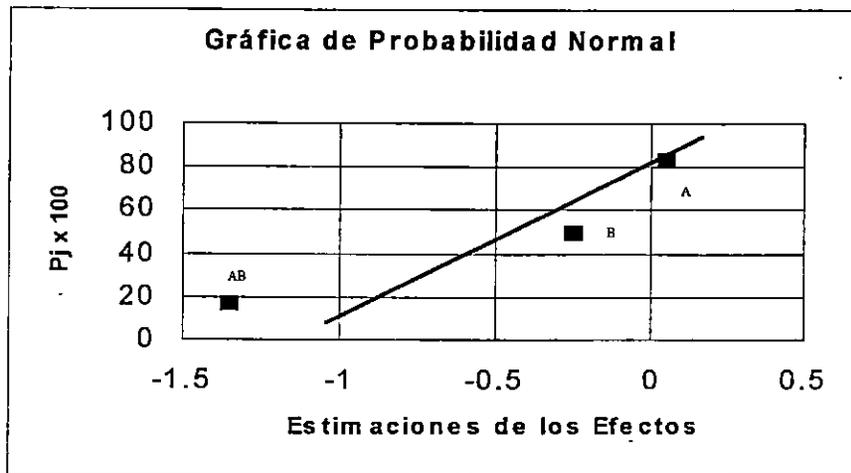


Fig. A-2 Gráfica de Probabilidad Normal

El diagrama de Pareto es en sí un diagrama de barras y se construye colocando en el eje horizontal las estimaciones de los efectos y en el eje vertical los nombres de los factores e interacciones correspondientes, éste eje debe dividirse en un número de intervalos igual al número de factores e interacciones involucrados.

En la fig. A-3 se muestra el diagrama de Pareto, la línea vertical en el diagrama, representa el nivel de significancia para las estimaciones de los efectos. Los factores e interacciones que se ubican al lado derecho de dicha línea son significativos.

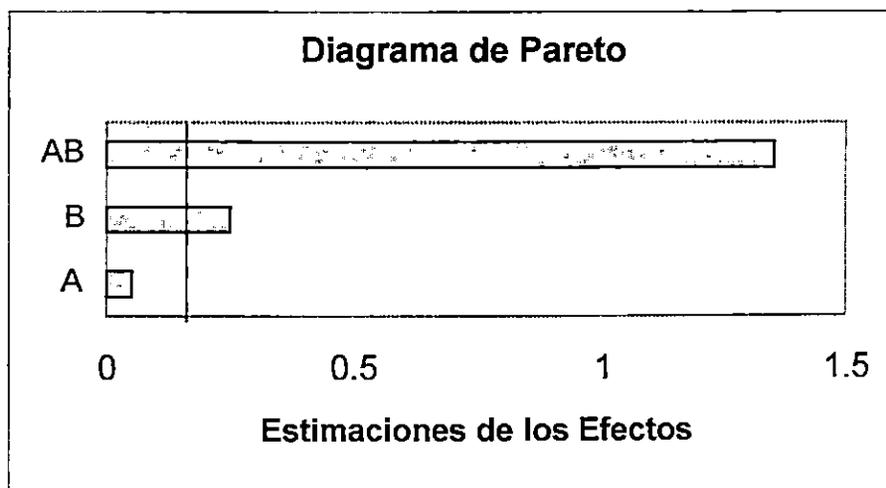


Fig. A-3 Diagrama de Pareto

ANEXO B

METODO ANALITICO PARA LA DETERMINACION DEL CONTENIDO DE INDIGOTINA DEL AÑIL

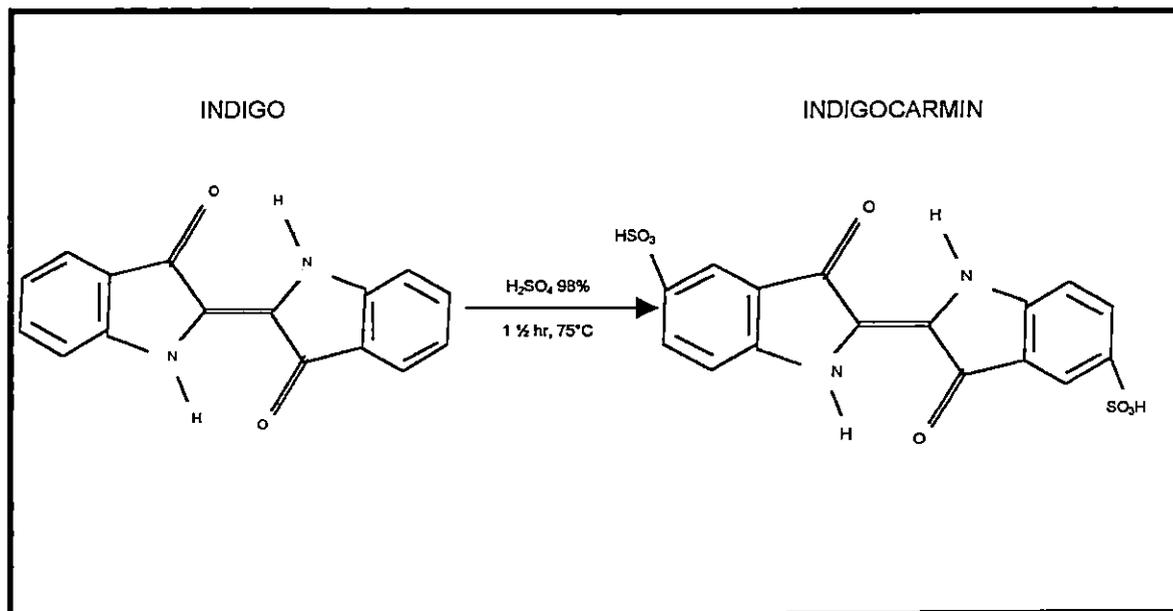
1. PRINCIPIOS

El indigo es tratado con ácido sulfúrico para transformarlo en indigocarmin. Por medio de esta reacción, pasa de una forma no soluble en agua a una soluble en agua.

Se determina la absorbancia específica del indigocarmin soluble en agua por espectrofotometría.

Se compara la absorbancia específica de la muestra con la del estándar.

2. REACCION QUIMICA



3. PROCEDIMIENTO

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 (± 0.1 mg) en la balanza y colocarla en un erlenmeyer de 125 ml, tapparla 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 1 ½ hora, utilizando un hot-plate y conservando la temperatura a $75\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Después, dejar enfriar el erlenmeyer con la mezcla, en agua con hielo, hasta que llegue a una temperatura aproximadamente de 20°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°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%.

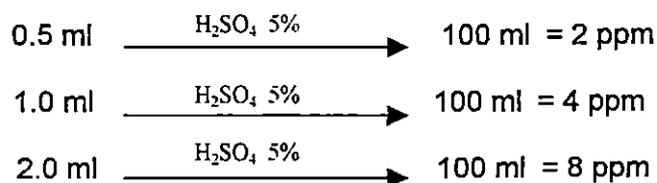
6. Medir la absorbancia correspondiente a dicha muestra a su máximo.

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

Con el fin de encontrar una ecuación para el estándar, la cual nos 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 concentración (ppm) para el estándar al 98%. La ecuación obtenida para el modelo nos permitirá encontrar la concentración correspondiente a la muestra a analizar.

3. 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:

$$\%Ind. = \frac{ppm * vol * f.d. * 100}{W_m \times 10^6}$$

en donde: ppm = concentración de la muestra

vol. = volúmen de la solución de reserva (250 ml)

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

W_m = peso de la muestra

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

ANEXO C

PRUEBAS Y ESTIMACIONES DE LAS MEDIAS DE POBLACIONES CUANDO σ NO SE CONOCE

Supongamos que n muestras x_1, x_2, \dots, x_n pertenecen a una población con media μ y una desviación estándar σ . Entonces la distribución muestral de

$$u = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}$$

puede considerarse como la distribución normal. Esto se aplica a la prueba y estimación de la media de una población cuando σ es conocida. Sin embargo, a veces ocurre que σ no se conoce. En este caso, parece natural reemplazar σ por s y usar

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s / \sqrt{n}}$$

en lugar de u , donde s es la desviación estándar de la muestra,

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Para usar esta estadística para la prueba y estimación, debemos conocer la distribución muestral de t . Esta distribución se conoce como la distribución t con $(n-1)$ grados de libertad.

Para someter a prueba una hipótesis,

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0$$

Calcule t_o a partir de

$$t_o = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

y compárela con $t(n-1, \alpha)$ donde $t(n-1, \alpha)$ designa el punto de porcentaje de α bilateral de la distribución t con $(n-1)$ grados de libertad. Cuando $|t_o| \geq t(n-1, \alpha)$, rechace H_0 , y cuando $|t_o| \leq t(n-1, \alpha)$, acepte H_0 . En el caso de la prueba unilateral, es decir $H_1: \mu > \mu_0$ o $H_1: \mu < \mu_0$, t_o se compara con $t(n-1, 2\alpha)$ o $-t(n-1, 2\alpha)$, respectivamente.

Como el valor de t se distribuye como una distribución t con $\phi = n-1$, tenemos

$$\Pr\{-t(n-1, \alpha) < t < t(n-1, \alpha)\} = 1 - \alpha$$

Sustituyendo $\frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$ por t en la ecuación anterior y reordenando, obtenemos

$$\Pr\left\{\bar{x} - t(n-1, \alpha) \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t(n-1, \alpha) \frac{s}{\sqrt{n}}\right\} = 1 - \alpha$$

Los límites de confianza de μ al 95% son

$$\bar{x} \pm t(n-1, 0.05) \frac{s}{\sqrt{n}}$$

ANEXO D

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LAS MUESTRAS DE INDIGOTINA

| | | |
|--|---|---|
| SÍNTESIS INVESTIGACIONES, SÍNTESIS Y ANÁLISIS | <u>Laboratorio Síntesis Química de Centroamérica</u> Inscripción No. 519, Consejo Superior de Salud Pública. 37 calle oriente No. 804, San Salvador. | Tel: 286-7885 286-3234 Fax: (503) 208-1338 sintesis@sal.gubm.net |
|--|---|---|

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS: INFORME.

Informe: 00-004.

Fecha: diciembre 21 del 2000.

Producto analizado: Añil, producto final. Muestra No. 1 (El Sauce 00).

Procedencia: Proyecto "Añil de El Salvador", IICA, Santa Tecla, (tel. 286-1500).

Presentación: Vial pequeño, de vidrio, con tapa de rosca.

Descripción del producto: Polvo de color azul oscuro, contiene algunas partículas de mayor tamaño.

DETERMINACIONES REALIZADAS.

Contenido de Indigotina: 42,8%.

OBSERVACIONES.

-Fecha de recepción de la muestra: diciembre 15 del 2000.

-Muestreo externo al Laboratorio SÍNTESIS.

-Procedimiento analítico: determinación espectrofotométrica de Indigotina.

-Los resultados del ensayo corresponden solamente a la muestra entregada a SÍNTESIS, la cual se supone homogénea.

-Para reproducir totalmente este Informe se necesita la autorización escrita de SÍNTESIS.


Dr. Jorge Collazo García
GERENTE TÉCNICO.

| | | |
|--|---|--|
| <p>SÍNTESIS</p> <p>INVESTIGACIONES, SÍNTESIS Y ANÁLISIS</p> | <p><i>Laboratorio Síntesis Química de Centroamérica</i></p> <p>Inscripción No. 519, Consejo Superior de Salud Pública.</p> <p>37 calle oriente No. 804, San Salvador.</p> | <p>Tel: 286-7885 286-3234</p> <p>Fax: (503) 208-1338</p> <p>sintesis@sal.gbm.net</p> |
|--|---|--|

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS. INFORME.

Informe: 00-005.

Fecha: diciembre 21 del 2000.

Producto analizado: Añil, producto final. Muestra No. 3 (El Sauce 00).

Procedencia: Proyecto "Añil de El Salvador", IICA, Santa Tecla, (tel. 288-1500).

Presentación: Vial pequeño, de vidrio, con tapa de rosca.

Descripción del producto: Polvo de color azul oscuro, contiene algunas partículas de mayor tamaño.

DETERMINACIONES REALIZADAS.

Contenido de Indigotina: 32,3%.

OBSERVACIONES.

-Fecha de recepción de la muestra: diciembre 15 del 2000.

-Muestreo externo al Laboratorio SÍNTESIS.

-Procedimiento analítico: determinación espectrofotométrica de indigotina.

-Los resultados del ensayo corresponden solamente a la muestra entregada a SÍNTESIS, la cual se supone homogénea.

-Para reproducir totalmente este informe se necesita la autorización escrita de SÍNTESIS.


Dr. Jorge Collazo García
GERENTE TÉCNICO.

| | | |
|--|---|--|
| <p>SÍNTESIS</p> <p>INVESTIGACIONES, SÍNTESIS Y ANÁLISIS</p> | <p><i>Laboratorio Síntesis Química de Centroamérica</i></p> <p>Inscripción No. 519, Consejo Superior de Salud Pública.</p> <p>37 calle oriente No. 804, San Salvador.</p> | <p>Tel: 286-7885 286-3234</p> <p>Fax: (503) 208-1338</p> <p>sintesis@sal.gbm.net</p> |
|--|---|--|

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS. INFORME.

Informe: 00-006

Fecha: diciembre 21 del 2000.

Producto analizado: Añil, producto final. Muestra No. 4 (El Sauce 00).

Procedencia: Proyecto "Añil de El Salvador", IICA, Santa Tecla, (tel. 288-1500).

Presentación: Vial pequeño, de vidrio, con tapa de rosca.

Descripción del producto: Polvo de color azul oscuro, contiene algunas partículas de mayor tamaño.

DETERMINACIONES REALIZADAS.

Contenido de Indigotina: 24,4%

OBSERVACIONES.

-Fecha de recepción de la muestra: diciembre 15 del 2000.

-Muestreo externo al Laboratorio SÍNTESIS.

-Procedimiento analítico: determinación espectrofotométrica de indigotina.

-Los resultados del ensayo corresponden solamente a la muestra entregada a SÍNTESIS, la cual se supone homogénea.

-Para reproducir totalmente este informe se necesita la autorización escrita de SÍNTESIS.


Dr. Jorge Collazo García
GERENTE TÉCNICO

ANEXO E

TABLAS T VALOR

II. Puntos porcentuales de la distribución

| α | .40 | .25 | .10 | .05 | .025 | .01 | .005 | .0025 | .001 | .0005 |
|----------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | .325 | 1.000 | 3.078 | 6.314 | 12.706 | 31.821 | 63.657 | 127.32 | 318.31 | 636.62 |
| 2 | .289 | .816 | 1.886 | 2.920 | 4.303 | 6.965 | 9.925 | 14.089 | 23.326 | 31.598 |
| 3 | .277 | .765 | 1.638 | 2.353 | 3.182 | 4.541 | 5.841 | 7.453 | 10.213 | 12.924 |
| 4 | .271 | .741 | 1.533 | 2.132 | 2.776 | 3.747 | 4.604 | 5.598 | 7.173 | 8.610 |
| 5 | .267 | .727 | 1.476 | 2.015 | 2.571 | 3.365 | 4.032 | 4.773 | 5.893 | 6.869 |
| 6 | .265 | .727 | 1.440 | 1.943 | 2.447 | 3.143 | 3.707 | 4.317 | 5.208 | 5.959 |
| 7 | .263 | .711 | 1.415 | 1.895 | 2.365 | 2.998 | 3.499 | 4.019 | 4.785 | 5.408 |
| 8 | .262 | .706 | 1.397 | 1.860 | 2.306 | 2.896 | 3.355 | 3.833 | 4.501 | 5.041 |
| 9 | .261 | .703 | 1.383 | 1.833 | 2.262 | 2.821 | 3.250 | 3.690 | 4.297 | 4.781 |
| 10 | .260 | .700 | 1.372 | 1.812 | 2.228 | 2.764 | 3.169 | 3.581 | 4.144 | 4.587 |
| 11 | .260 | .697 | 1.363 | 1.796 | 2.201 | 2.718 | 3.106 | 3.497 | 4.025 | 4.437 |
| 12 | .259 | .695 | 1.356 | 1.782 | 2.179 | 2.681 | 3.055 | 3.428 | 3.930 | 4.318 |
| 13 | .259 | .694 | 1.350 | 1.771 | 2.160 | 2.650 | 3.012 | 3.372 | 3.852 | 4.221 |
| 14 | .258 | .692 | 1.345 | 1.761 | 2.145 | 2.624 | 2.977 | 3.326 | 3.787 | 4.140 |
| 15 | .258 | .691 | 1.341 | 1.753 | 2.131 | 2.602 | 2.947 | 3.286 | 3.733 | 4.073 |
| 16 | .258 | .690 | 1.337 | 1.746 | 2.120 | 2.583 | 2.921 | 3.252 | 3.686 | 4.015 |
| 17 | .257 | .689 | 1.333 | 1.740 | 2.110 | 2.567 | 2.898 | 3.222 | 3.646 | 3.965 |
| 18 | .257 | .688 | 1.330 | 1.734 | 2.101 | 2.552 | 2.878 | 3.197 | 3.610 | 3.922 |
| 19 | .257 | .688 | 1.328 | 1.729 | 2.093 | 2.539 | 2.861 | 3.174 | 3.579 | 3.883 |
| 20 | .257 | .687 | 1.325 | 1.725 | 2.086 | 2.528 | 2.845 | 3.153 | 3.552 | 3.850 |
| 21 | .257 | .686 | 1.323 | 1.721 | 2.080 | 2.518 | 2.831 | 3.135 | 3.527 | 3.819 |
| 22 | .256 | .686 | 1.321 | 1.717 | 2.074 | 2.508 | 2.819 | 3.119 | 3.505 | 3.792 |
| 23 | .256 | .685 | 1.319 | 1.714 | 2.069 | 2.500 | 2.807 | 3.104 | 3.485 | 3.767 |
| 24 | .256 | .685 | 1.318 | 1.711 | 2.064 | 2.492 | 2.797 | 3.091 | 3.467 | 3.745 |
| 25 | .256 | .684 | 1.316 | 1.708 | 2.060 | 2.485 | 2.787 | 3.078 | 3.450 | 3.725 |
| 26 | .256 | .684 | 1.315 | 1.706 | 2.056 | 2.479 | 2.779 | 3.067 | 3.435 | 3.707 |
| 27 | .256 | .684 | 1.314 | 1.703 | 2.052 | 2.473 | 2.771 | 3.057 | 3.421 | 3.690 |
| 28 | .256 | .683 | 1.313 | 1.701 | 2.048 | 2.467 | 2.763 | 3.047 | 3.408 | 3.674 |
| 29 | .256 | .683 | 1.311 | 1.699 | 2.045 | 2.462 | 2.756 | 3.038 | 3.396 | 3.659 |
| 30 | .256 | .683 | 1.310 | 1.697 | 2.042 | 2.457 | 2.750 | 3.030 | 3.385 | 3.646 |
| 40 | .255 | .681 | 1.303 | 1.684 | 2.021 | 2.423 | 2.704 | 2.971 | 3.307 | 3.551 |
| 60 | .254 | .679 | 1.296 | 1.671 | 2.000 | 2.390 | 2.660 | 2.915 | 3.232 | 3.460 |
| 120 | .254 | .677 | 1.289 | 1.658 | 1.980 | 2.358 | 2.617 | 2.860 | 3.160 | 3.373 |
| ∞ | .253 | .674 | 1.282 | 1.645 | 1.960 | 2.326 | 2.576 | 2.807 | 3.090 | 3.291 |

v = grados de libertad.

Adaptado, con permiso, de *Biometrika Tables for Statisticians*, Vol. 1, 3a. ed., por E. S. Pearson y H. O. Hartley, Cambridge University Press, Cambridge, 1966.

ANEXO F

PUNTOS PORCENTUALES DE LA DISTRIBUCION F

F_{α, p_1, p_2}

Grados de libertad para el numerador (p_1)

| $p_2 \backslash p_1$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 20 | 24 | 30 | 40 | 60 | 120 | ∞ |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 1 | 647.8 | 799.5 | 864.2 | 899.6 | 921.8 | 937.1 | 948.2 | 956.7 | 963.3 | 968.6 | 976.7 | 984.9 | 993.1 | 997.2 | 1001 | 1006 | 1010 | 1014 | 1018 |
| 2 | 38.51 | 39.00 | 39.17 | 39.25 | 39.30 | 39.33 | 39.36 | 39.37 | 39.39 | 39.40 | 39.41 | 39.43 | 39.45 | 39.46 | 39.46 | 39.47 | 39.48 | 39.49 | 39.50 |
| 3 | 17.44 | 16.04 | 15.44 | 15.10 | 14.88 | 14.73 | 14.62 | 14.54 | 14.47 | 14.42 | 14.34 | 14.25 | 14.17 | 14.12 | 14.08 | 14.04 | 13.99 | 13.95 | 13.90 |
| 4 | 12.22 | 10.65 | 9.98 | 9.60 | 9.36 | 9.20 | 9.07 | 8.98 | 8.90 | 8.84 | 8.75 | 8.66 | 8.56 | 8.51 | 8.46 | 8.41 | 8.36 | 8.31 | 8.26 |
| 5 | 10.01 | 8.43 | 7.76 | 7.39 | 7.15 | 6.98 | 6.85 | 6.76 | 6.68 | 6.62 | 6.52 | 6.43 | 6.33 | 6.28 | 6.23 | 6.18 | 6.12 | 6.07 | 6.02 |
| 6 | 8.81 | 7.26 | 6.60 | 6.23 | 5.99 | 5.82 | 5.70 | 5.60 | 5.52 | 5.46 | 5.37 | 5.27 | 5.17 | 5.12 | 5.07 | 5.01 | 4.96 | 4.90 | 4.85 |
| 7 | 8.07 | 6.54 | 5.89 | 5.52 | 5.29 | 5.12 | 4.99 | 4.90 | 4.82 | 4.76 | 4.67 | 4.57 | 4.47 | 4.42 | 4.36 | 4.31 | 4.25 | 4.20 | 4.14 |
| 8 | 7.57 | 6.06 | 5.42 | 5.05 | 4.82 | 4.65 | 4.53 | 4.43 | 4.36 | 4.30 | 4.20 | 4.10 | 4.00 | 3.95 | 3.89 | 3.84 | 3.78 | 3.73 | 3.67 |
| 9 | 7.21 | 5.71 | 5.08 | 4.72 | 4.48 | 4.32 | 4.20 | 4.10 | 4.03 | 3.96 | 3.87 | 3.77 | 3.67 | 3.61 | 3.56 | 3.51 | 3.45 | 3.39 | 3.33 |
| 10 | 6.94 | 5.46 | 4.83 | 4.47 | 4.24 | 4.07 | 3.95 | 3.85 | 3.78 | 3.72 | 3.62 | 3.52 | 3.42 | 3.37 | 3.31 | 3.26 | 3.20 | 3.14 | 3.08 |
| 11 | 6.72 | 5.26 | 4.63 | 4.28 | 4.04 | 3.88 | 3.76 | 3.66 | 3.59 | 3.53 | 3.43 | 3.33 | 3.23 | 3.17 | 3.12 | 3.06 | 3.00 | 2.94 | 2.88 |
| 12 | 6.55 | 5.10 | 4.47 | 4.12 | 3.89 | 3.73 | 3.61 | 3.51 | 3.44 | 3.37 | 3.28 | 3.18 | 3.07 | 3.02 | 2.96 | 2.91 | 2.85 | 2.79 | 2.72 |
| 13 | 6.41 | 4.97 | 4.35 | 4.00 | 3.77 | 3.60 | 3.48 | 3.39 | 3.31 | 3.25 | 3.15 | 3.05 | 2.95 | 2.89 | 2.84 | 2.78 | 2.72 | 2.66 | 2.60 |
| 14 | 6.30 | 4.86 | 4.24 | 3.89 | 3.66 | 3.50 | 3.38 | 3.29 | 3.21 | 3.15 | 3.05 | 2.95 | 2.84 | 2.79 | 2.73 | 2.67 | 2.61 | 2.55 | 2.49 |
| 15 | 6.20 | 4.77 | 4.15 | 3.80 | 3.58 | 3.41 | 3.29 | 3.20 | 3.12 | 3.06 | 2.96 | 2.86 | 2.76 | 2.70 | 2.64 | 2.59 | 2.52 | 2.46 | 2.40 |
| 16 | 6.12 | 4.69 | 4.07 | 3.73 | 3.50 | 3.34 | 3.22 | 3.12 | 3.05 | 2.99 | 2.89 | 2.79 | 2.68 | 2.63 | 2.57 | 2.51 | 2.45 | 2.38 | 2.32 |
| 17 | 6.04 | 4.62 | 4.01 | 3.66 | 3.44 | 3.28 | 3.16 | 3.06 | 2.98 | 2.92 | 2.82 | 2.72 | 2.62 | 2.56 | 2.50 | 2.44 | 2.38 | 2.32 | 2.25 |
| 18 | 5.98 | 4.56 | 3.95 | 3.61 | 3.38 | 3.22 | 3.10 | 3.01 | 2.93 | 2.87 | 2.77 | 2.67 | 2.56 | 2.50 | 2.44 | 2.38 | 2.32 | 2.26 | 2.19 |
| 19 | 5.92 | 4.51 | 3.90 | 3.56 | 3.33 | 3.17 | 3.05 | 2.96 | 2.88 | 2.82 | 2.72 | 2.62 | 2.51 | 2.45 | 2.39 | 2.33 | 2.27 | 2.20 | 2.13 |
| 20 | 5.87 | 4.46 | 3.86 | 3.51 | 3.29 | 3.13 | 3.01 | 2.91 | 2.84 | 2.77 | 2.68 | 2.57 | 2.46 | 2.41 | 2.35 | 2.29 | 2.22 | 2.16 | 2.09 |
| 21 | 5.83 | 4.42 | 3.82 | 3.48 | 3.25 | 3.09 | 2.97 | 2.87 | 2.80 | 2.73 | 2.64 | 2.53 | 2.42 | 2.37 | 2.31 | 2.25 | 2.18 | 2.11 | 2.04 |
| 22 | 5.79 | 4.38 | 3.78 | 3.44 | 3.22 | 3.05 | 2.93 | 2.84 | 2.76 | 2.70 | 2.60 | 2.50 | 2.39 | 2.33 | 2.27 | 2.21 | 2.14 | 2.08 | 2.00 |
| 23 | 5.75 | 4.35 | 3.75 | 3.41 | 3.18 | 3.02 | 2.90 | 2.81 | 2.73 | 2.67 | 2.57 | 2.47 | 2.36 | 2.30 | 2.24 | 2.18 | 2.11 | 2.04 | 1.97 |
| 24 | 5.72 | 4.32 | 3.72 | 3.38 | 3.15 | 2.99 | 2.87 | 2.78 | 2.70 | 2.64 | 2.54 | 2.44 | 2.33 | 2.27 | 2.21 | 2.15 | 2.08 | 2.01 | 1.94 |
| 25 | 5.69 | 4.29 | 3.69 | 3.35 | 3.13 | 2.97 | 2.85 | 2.75 | 2.68 | 2.61 | 2.51 | 2.41 | 2.30 | 2.24 | 2.18 | 2.12 | 2.05 | 1.98 | 1.91 |
| 26 | 5.66 | 4.27 | 3.67 | 3.33 | 3.10 | 2.94 | 2.82 | 2.73 | 2.65 | 2.59 | 2.49 | 2.39 | 2.28 | 2.22 | 2.16 | 2.09 | 2.03 | 1.95 | 1.88 |
| 27 | 5.63 | 4.24 | 3.65 | 3.31 | 3.08 | 2.92 | 2.80 | 2.71 | 2.63 | 2.57 | 2.47 | 2.36 | 2.25 | 2.19 | 2.13 | 2.07 | 2.00 | 1.93 | 1.85 |
| 28 | 5.61 | 4.22 | 3.63 | 3.29 | 3.06 | 2.90 | 2.78 | 2.69 | 2.61 | 2.55 | 2.45 | 2.34 | 2.23 | 2.17 | 2.11 | 2.05 | 1.98 | 1.91 | 1.83 |
| 29 | 5.59 | 4.20 | 3.61 | 3.27 | 3.04 | 2.88 | 2.76 | 2.67 | 2.59 | 2.53 | 2.43 | 2.32 | 2.21 | 2.15 | 2.09 | 2.03 | 1.96 | 1.89 | 1.81 |
| 30 | 5.57 | 4.18 | 3.59 | 3.25 | 3.03 | 2.87 | 2.75 | 2.65 | 2.57 | 2.51 | 2.41 | 2.31 | 2.20 | 2.14 | 2.07 | 2.01 | 1.94 | 1.87 | 1.79 |
| 40 | 5.42 | 4.05 | 3.46 | 3.13 | 2.90 | 2.74 | 2.62 | 2.53 | 2.45 | 2.39 | 2.29 | 2.18 | 2.07 | 2.01 | 1.94 | 1.88 | 1.80 | 1.72 | 1.64 |
| 60 | 5.29 | 3.93 | 3.34 | 3.01 | 2.79 | 2.63 | 2.51 | 2.41 | 2.33 | 2.27 | 2.17 | 2.06 | 1.94 | 1.88 | 1.82 | 1.74 | 1.67 | 1.58 | 1.48 |
| 120 | 5.15 | 3.80 | 3.23 | 2.89 | 2.67 | 2.52 | 2.39 | 2.30 | 2.22 | 2.16 | 2.05 | 1.94 | 1.82 | 1.76 | 1.69 | 1.61 | 1.53 | 1.43 | 1.31 |
| ∞ | 5.02 | 3.69 | 3.12 | 2.79 | 2.57 | 2.41 | 2.29 | 2.19 | 2.11 | 2.05 | 1.94 | 1.83 | 1.71 | 1.64 | 1.57 | 1.48 | 1.39 | 1.27 | 1.00 |

Grados de libertad para el denominador (p_2)

ANEXO G

ANÁLISIS DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

Las técnicas de diseño y análisis de experimentos, permiten al experimentador seleccionar aquellos factores que influyen en una determinada característica de calidad, y los niveles de los mismos que optimicen tal característica en la región donde se haya experimentado.

En la práctica, el experimentador desea extender estos objetivos a otras regiones de experimentación y se pregunta: ¿qué factores influyen en la característica en general?, ¿cuál es la región óptima?, ¿cómo se relacionan los factores con la respuesta en esta región?

G-1 Introducción. Necesidad de los Modelos

Uno de los deseos más fuertes que a lo largo de la historia ha mostrado la humanidad es el de *modelar la realidad*, es decir, el de encontrar funciones matemáticas que expliquen los distintos fenómenos de índole física, social, económica, etc.

En la práctica, es muy difícil intentar resolver este problema de buscar un modelo único, si no utópico. En su lugar, se intenta aproximar tales relaciones de forma local a través de funciones polinómicas de primer y segundo orden. Además, el análisis de estas aproximaciones permitirá localizar la región óptima de una manera secuencial.

G-2 Grado de Conocimiento y Objetivos

Los modelos pueden ser, atendiendo al método que se siga para obtenerlos, mecanicistas o empíricos. En los primeros se utilizan leyes físicas especializadas en el dominio concreto para seleccionar la estructura del modelo y, en general, es necesario estimar los parámetros que en ellos aparecen a través de la recogida de datos.

Cuando no se tiene conocimiento teórico de la estructura del modelo, se hace una aproximación de forma empírica con los datos obtenidos en la experimentación. Tal experimentación se ha de realizar de una forma secuencial y con una metodología que dependerá del grado de conocimiento que se tenga del problema. Este conocimiento ayudará en la selección de un modelo que se ajuste a la respuesta y en la selección del diseño a realizar para poder estimar todos los parámetros de interés.

G-3 Diseños de Superficie de Respuesta

La metodología de superficie de respuesta (MSR o RSM, por sus siglas en inglés) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para modelar y analizar problemas en los cuales una respuesta de interés es influida por varias variables, y el objetivo es optimizar esta respuesta.

Se puede considerar que la metodología de la superficie de respuesta se compone de dos etapas:

1. **Una etapa de primer orden**, en la que se propone un modelo matemático de primer orden; se prepara un factorial u otro diseño de primer orden, se adaptan los datos, se bosquejan los contornos de la superficie de respuesta y se determina y persigue la dirección de mayor pendiente.
2. **Una etapa de segundo orden**, en la cual se propone un modelo matemático de segundo orden; se prepara un compuesto central u otro diseño de segundo orden, se adaptan los datos, se bosquejan los contornos, se prepara un análisis canónico y se localiza el óptimo.

En la mayoría de los problemas de RSM, la forma de la relación entre la respuesta y las variables independientes se desconoce. Por ello, el primer paso en la RSM consiste en determinar una aproximación apropiada a la relación funcional real entre la respuesta y el conjunto de variables independientes. Por lo general se emplea un polinomio de orden bajo sobre alguna región de las variables independientes. Si la respuesta es descrita adecuadamente por una función lineal de las variables independientes, la función de aproximación es el modelo de primer orden.

Debe usarse un polinomio de mayor grado, por ejemplo el modelo de segundo orden cuando existe curvatura en el sistema. Los modelos de segundo orden necesitan más experimentos para ser estimados y sólo se recurre a ellos cuando existe evidencia de curvatura en el modelo y, por lo tanto, la aproximación lineal no es adecuada. Para poder detectar la curvatura, a los diseños de 2^{k-p} se les añaden puntos centrales, los cuales permitirán realizar un test de curvatura.

Aquellas regiones de experimentación en las que la superficie no presenta evidencia de curvatura son interpretadas como regiones lejanas a la zona óptima y, una vez más, existe una estrategia consistente en acercarse lo más rápidamente a esta zona a lo largo de la dirección de máximo cambio de la respuesta. Por último, una vez se detecta la cercanía de la región óptima, se pasa a la utilización de estrategias de segundo orden. Una de ellas consiste en la selección de un diseño de segundo orden apropiado que permita una buena estimación de un modelo cuadrático.

Una vez obtenida una aproximación cuadrática que se ajuste a la superficie, es conveniente realizar un análisis canónico del modelo resultante para interpretar de manera sencilla la geometría de la superficie estimada en la región de experimentación y obtener información que pueda ser útil para sugerir posibles explicaciones teóricas del problema.

G-3.1 Estrategia de Primer Orden

- **Definir el objetivo de la investigación**

Es de máxima importancia definir claramente el objetivo del estudio que se va a realizar. Es sorprendente como, en la práctica y con frecuencia, esta etapa es ignorada o no se le da la atención que merece, y cómo conduce a posteriores dificultades.

- **Seleccionar factores e intervalos**

La siguiente etapa es seleccionar los factores a estudiar junto con los intervalos en que han de ser estudiados. Es necesario, para entender los aspectos técnicos de la

situación experimental, que eso se haga inteligentemente. También debe elegirse la escala concreta en que cada factor se estudiará.

- **Realizar el diseño y reunir los datos**

Se prepara el diseño factorial, y se determina aleatoriamente el orden de los ensayos, se realizan los experimentos y se obtienen los resultados.

- **Decidir el modelo de primer orden y controlar su adecuación**

El análisis de estos resultados puede conducir a uno de dos caminos equivalentes. Los efectos e interacciones del diseño factorial pueden calcularse con sus correspondientes intervalos de confianza del 95 por 100.

En la figura G-1, se esquematiza los diferentes pasos a seguir para una estrategia de primer orden.

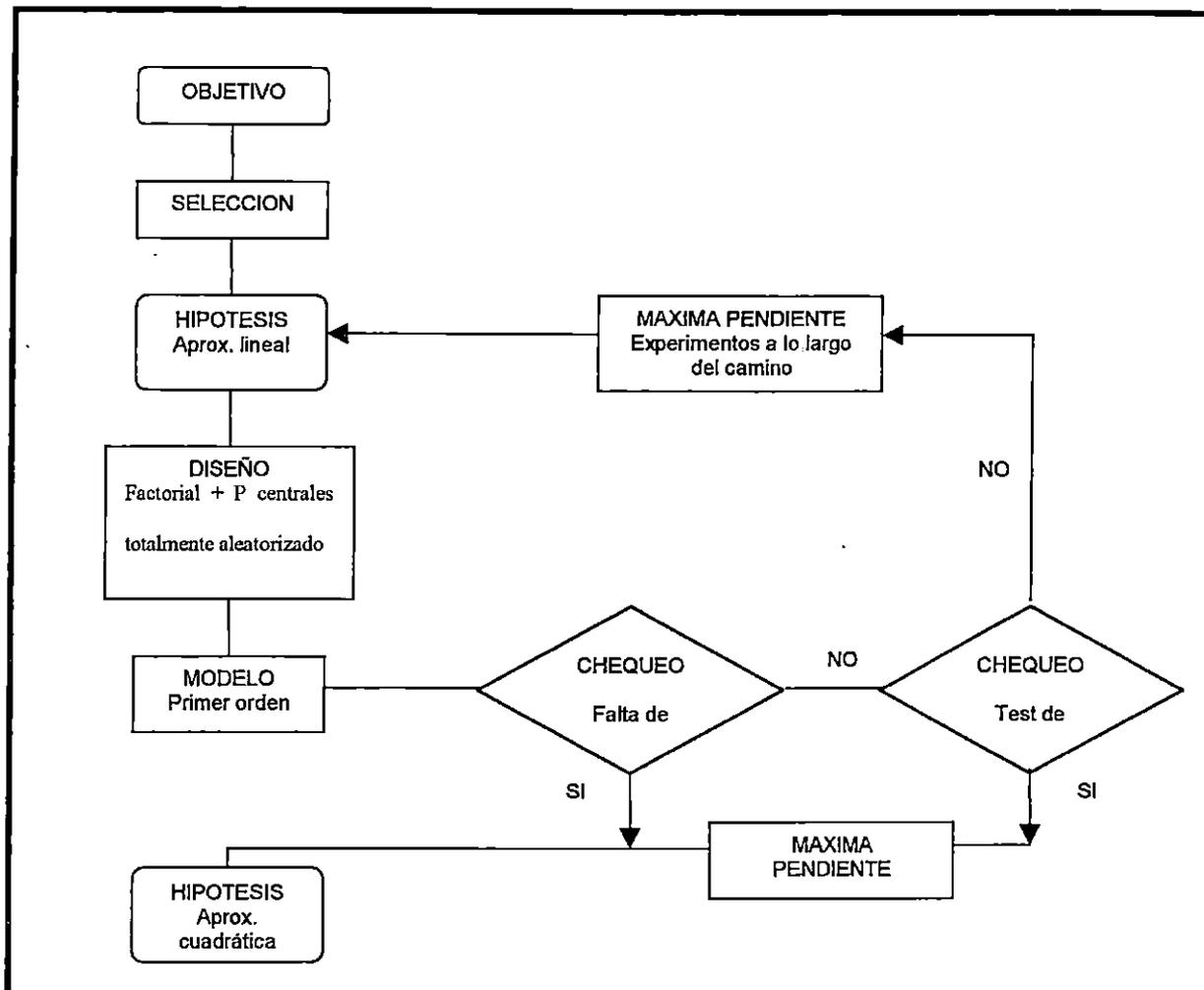


Fig. G-1. Flujograma de Estrategia de Primer Orden

G-3.2 Estrategia de Segundo Orden

Para la estrategia de segundo orden se deberá realizar el diseño y reunir los datos. Ya que se ha detectado una falta de adecuación, el diseño se ampliará con la adición de ensayos para formar el diseño de segundo orden (compuesto-central).

Tal análisis será aproximadamente equivalente al análisis del sistema real, si la superficie ajustada es una aproximación adecuada a la función de respuesta real. La estimación de los parámetros del modelo se hace más eficazmente si se utilizan los diseños

experimentales apropiados para recopilar los datos. A menudo los diseños usados para ajustar superficies de respuesta se denominan diseños de superficie de respuesta.

En la figura G-2 se esquematiza los diferentes pasos a seguir en una estrategia de segundo orden.

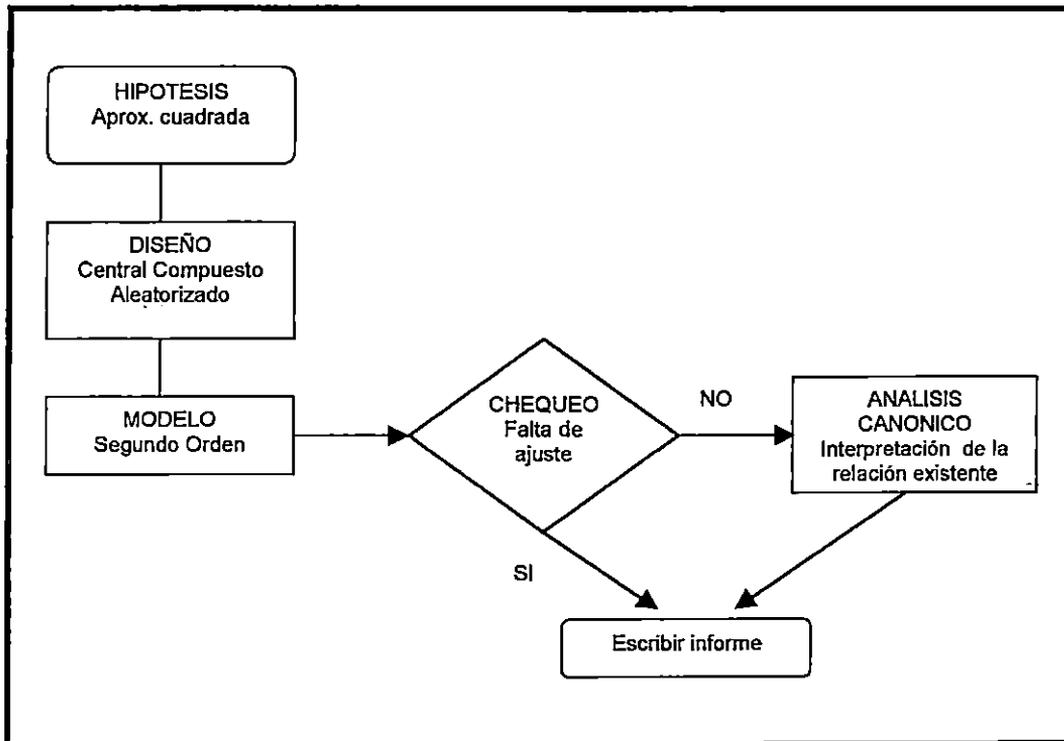


Fig. G-2. Flujograma de Estrategia de Segundo Orden

G-4 Diseños Experimentales para Ajustar Superficies de Respuesta

El ajuste y análisis de superficies de respuesta se facilitan en gran medida con la elección apropiada de un diseño experimental. Cuando se selecciona un diseño de superficie de respuesta, algunas de las características de un diseño deseable son:

1. Proporciona una distribución razonable de puntos de datos (y por tanto información) en toda la región de interés.

2. Permite investigar la idoneidad del modelo, incluyen la falta de ajuste.
3. Permite la realización de experimentos en bloques.
4. Permite la construcción secuencial de diseños de orden superior.
5. Proporciona una estimación de error interna.
6. No requiere un número grande de corridas.
7. No requiere demasiados niveles de las variables independientes.
8. Asegura simplicidad de los cálculos de los parámetros del modelo.

G-4.1 Diseños para Ajustar el Modelo de Segundo Orden

Un diseño experimental para ajustar un modelo de segundo orden debe tener por lo menos tres niveles de cada factor. Existen muchos diseños que podrían emplearse para ajustar un modelo de segundo orden, así que elegir un diseño apropiado es útil con objeto de establecer un criterio de diseño (Montgomery, 1991). El hecho de realizar la experimentación en dos tiempos puede provocar un efecto bloque, que puede afectar a la estimación de los efectos si las condiciones experimentales del segundo diseño no se han seleccionado correctamente.

Una de las propiedades que se deben tomar en cuenta es la ortogonalidad, la cual es la propiedad de diseño óptima ya que minimiza la variancia de los coeficientes de regresión.

La otra propiedad es la rotabilidad. Se dice que un diseño es rotable si la precisión en la estimación de la superficie es igual para todos los puntos equidistantes del centro del diseño, independiente de la dirección en que se encuentren (Juran, 1997). Esta propiedad es muy importante en la elección de un diseño de superficie de respuesta. Dado que la finalidad de la RSM es la optimización y se desconoce la localización del

óptimo antes de correr el experimento, tiene sentido usar un diseño que proporcione estimaciones igualmente precisas en todas las direcciones (Montgomery, 1991).

Existen varios diseños para ajustar superficies de respuestas a decir:

- a) Diseño Compuesto Central
- b) Diseño Compuesto Central Centrado en las Caras
- c) Diseño de Box y Behnken
- d) Diseños Equirradiales

a) Diseño Compuesto Central

Este consiste en un factorial o factorial fraccionado 2^k aumentado por 2^k puntos axiales y n_c puntos centrales, este diseño experimental es probablemente el más utilizado para ajustar superficies de respuesta de segundo orden.

Un diseño compuesto central se convierte en rotatable mediante la elección de α . El valor de α para lograr la conversión a diseño rotatable, depende del número de puntos de la porción factorial del diseño. De hecho, $\alpha = (n_f)^{1/4}$ proporciona un diseño compuesto central rotatable, donde f es el número de puntos en la porción factorial del diseño.

En la Tabla G-1 se proporcionan los parámetros de los diseños centrales compuestos girables, tanto ortogonales como de precisión uniforme, para diversos valores de k .

Tabla G-1. Diseño Compuesto Centrales Girables Ortogonales y Uniformes

| | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | ½ rep | | ½ rep | ½ rep | ½ rep |
| n_f | 4 | 8 | 16 | 32 | 16 | 64 | 32 | 64 | 128 |
| Puntos axiales n_a | 4 | 6 | 8 | 10 | 10 | 12 | 12 | 14 | 16 |
| N_c (p.u.) | 5 | 6 | 7 | 10 | 6 | 15 | 9 | 14 | 20 |
| N_c (ort.) | 8 | 9 | 12 | 17 | 10 | 24 | 15 | 22 | 33 |
| $N(p.u.)$ | 13 | 20 | 31 | 52 | 32 | 91 | 53 | 92 | 164 |
| $N(ort.)$ | 16 | 23 | 36 | 59 | 36 | 100 | 59 | 100 | 177 |
| α | 1.414 | 1.682 | 2.000 | 2.378 | 2.000 | 2.828 | 2.378 | 2.828 | 3.364 |

b) Diseño Compuesto Central Centrado en las Caras

Este es una variante del diseño compuesto central, en el cual $\alpha = 1$. En este diseño los puntos estrella o axiales se localizan en los centros de las caras del cubo. Sin embargo, los diseños compuestos centrales centrados en las caras no son rotables, y esto se considera una serie desventaja.

En la Tabla G-2 se muestran el número de corridas o número factorial y los puntos centrales para k de 3, 4, 5.

Tabla G-2. Diseño Compuesto Central Centrado en las Caras

| K | 3 | 4 | 5 |
|-------|----|----|----|
| n_f | 16 | 16 | 28 |
| n_c | 1 | 1 | 1 |

c) Diseño Box y Behnken

Este diseño se forma combinando factoriales 2^k con diseños de bloques incompletos. Los diseños resultantes suelen ser más eficientes en términos del número de corridas requerido, y son rotables (o casi rotables).

En la Tabla G-3 se presenta el diseño Box y Behnken con su número factorial y puntos centrales para $k = 3, 4$ y 5 .

Tabla G-3. Diseño Box y Behnken

| k | 3 | 4 | 5 |
|-------|----|----|----|
| n_f | 15 | 27 | 46 |
| n_c | 3 | 3 | 6 |

d) Diseño Equirradiales

Este diseño es útil en problemas con dos o tres variables. Estos diseños consisten en puntos igualmente espaciados sobre una circunferencia ($k=2$) o una esfera ($k=3$), y son polígonos regulares o poliedros. A menudo, estos arreglos se conocen como diseños equirradiales porque los puntos del diseño son equidistantes del origen.

ANEXO H
MEMORIA DE CALCULO

H-1 Cálculo de la potencia de la bomba y de las pérdidas en accesorios y en tuberías

Para el cálculo de la potencia se emplea la ecuación general de flujo de fluidos planteada por Bernoulli:

$$- \dot{P} = \left(\frac{\Delta v^2}{2g_c} + \Delta Z \frac{g}{g_c} + \frac{\Delta p}{\rho} \right) M + \sum h_m$$

Para el cálculo de las pérdidas provocadas por accesorios se utiliza la ecuación planteada por Darcy, donde K_m es el coeficiente de resistencia para los diferentes tipos de accesorios.

$$h_m = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g_c}$$

de donde: $k_m = f \frac{L}{D}$

$$h_m = k_m \frac{v^2}{2g_c}$$

esta ecuación se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio.

CALCULOS

Evaluación de pérdidas para los diferentes accesorios, tomando los valores del coeficiente de resistencia (K_m), del libro Hidráulica de Tuberías (Juan G. Saldarriaga U).

Las pérdidas por fricción en la tubería de 1 plg es:

Para la entrada a la tubería $K_m = 0.9$

Para las conexiones o uniones $k_m = 0.3$

Para 2 válvulas de globo $K_m = 10$

Para la salida $K_m = 1$

Para la tubería $K_m = 1$

Para 3 codos de 90° $K_m = 0.9$

La densidad del agua a 25° : $\rho = 980$

Gravedad: $g = 9.8$

La velocidad del flujo en la tubería es:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.01205 \frac{m^3}{min} * \frac{1 min}{60 seg}}{1m^2} = 0.01205 \frac{m}{s}$$

$$\sum K_m = 0.9 + (5 \times 0.3) + (2 \times 20) + 2.9 + 1 + (3 \times 0.9) = 50.9$$

$$\sum h_m = 50.9 \frac{(0.01205)^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 \times 9.8 \frac{m}{s^2}} = 0.04031307m.$$

El flujo masico es:

$$M = Q \times \rho = (0.01205) \frac{m^3}{s} (980) \frac{m}{s^2} = 11.809 \frac{kg}{s}$$

La potencia absorbida por la bomba, tomando en cuenta que la caída de presión y la energía cinética son igual a cero es:

$$-P = \left(\Delta Z \frac{g}{g_c} \right) M + h_{im}$$

La energía potencial:

$$\Delta z \frac{g}{g_c} = 1.3 \frac{kgf \cdot m}{kg}$$

$$P = (1.3 + 0.04031307) (11.809) \left(\frac{kg}{s} \right) \left(\frac{kgf \cdot m}{kgm} \right)$$

$$P = 15.828 \frac{kgf \cdot m}{s} \left(\frac{1kw}{102 \frac{kgf \cdot m}{s}} \right) \left(\frac{1HP}{0.746Kw} \right) = 0.208HP$$

$$P = \frac{P_{teórica}}{eficiencia} = \frac{0.208HP}{0.85} = 0.245 HP$$

H-2 Cálculo para los requerimientos de oxígeno en el sistema de aireación

La evaluación de los requerimientos de oxígeno en el sistema, se hacen a partir de la cantidad de aire suministrado a la muestra en la etapa de oxigenación, esta cantidad es la que corresponde a las condiciones óptimas que se determinaron para el experimento, luego, en base a este dato se estima el numero de difusores que serán necesarios para suplir tal necesidad.

$$Q_{\text{aire suministrado}} = 1495.35 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}} \times \frac{1\text{m}^3}{35.31\text{pie}^3} \times 2.38 \frac{\text{kg}}{1\text{m}^3} = 6,047.5 \frac{\text{kgaire}}{\text{m}^3}$$

Es necesario evaluar la potencia que se requiere para el compresor a estas condiciones de aireación. Para ello se hace uso de la siguiente ecuación, la cual ha sido tomada del Manual de Ingeniero Químico (Perry & Chilton, 1973, ec. 6.31), este cálculo servirá para evaluar el caudal de aire /Kw- hr que se necesita.

$$P = 0.0044 (P_1) (Q) \left(\ln \frac{P_1}{P_2} \right)$$

En donde P_1 Y P_2 , son la presión a la entrada y salida del aire en el compresor.

Esta ecuación esta dada para las siguientes unidades:

$$\text{Caudal, Q en : } \frac{\text{Pie}^3}{\text{min}}$$

$$\text{Presión, P en : Psia}$$

$$P = 0.0044 (14.7) (1495.35) \left(\ln \left(\frac{15.97}{14.7} \right) \right) = 8 \text{ HP}$$

$$Q_{\text{aire suministrado}} = 6,047.5 \frac{\text{kgaire}}{\text{hr}} \times \frac{1\text{HP}}{8\text{HP}} \times \frac{1}{0.746\text{Kw}} = 1013.321 \frac{\text{kgaire}}{\text{Kw} - \text{hr}}$$

$$O_{\text{oxigeno}} = (1013.321) \left(\frac{\text{kgaire}}{\text{Kw} - \text{hr}} \right) (0.21) \left(\frac{\text{molO}_2}{\text{molAire}} \right) \left(\frac{32\text{KgO}_2}{\text{molO}_2} \right) = 234.31 \frac{\text{KgO}_2}{\text{Kw} - \text{hr}}$$

Para evaluar el número de unidades (difusores) que se necesitan se tiene, que el fabricante o el proveedor proporciona la eficiencia que estos dispositivos ofrecen, para este sistema se utilizarán Difusores de tipo Domo, para los cuales se tiene las siguientes especificaciones.

Eficiencia: $(2.5 - 7.5) \frac{KgO_2}{Kw - hr}$ Referencia : Repicky S.A., Argentina.

Tomando una eficiencia promedio de, $6 \frac{KgO_2}{Kw - hr}$ se tiene que, de acuerdo al caudal de oxígeno estimado el número de Difusores a instalar en el sistema es:

ND = Numero de Difusores

$$ND = (234.81 \frac{KgO_2}{Kw - hr}) \left(\frac{1 \text{ difusor}}{6 \frac{KgO_2}{Kw - hr}} \right) = 39.135 \text{ Difusores}$$

ND = 40

ANEXO I

RESULTADOS DE ANÁLISIS FISCOQUIMICOS REALIZADOS EN MUESTRA DE AGUA PROVENIENTE DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE AÑIL



San Salvador, 18 de Septiembre de 2001.

Señores
PROYECTOS AGRO INDUSTRIAS, GTZ
 Trabajo de Graduación Añil
 Universidad de El Salvador
 Presente.

NUMERO DE PAGINAS DE REPORTE: 1/2
 CODIGO DE MUESTRA: 620S
 FECHA DE RECIBO DE MUESTRA: 12-09-2001
 ATENCION: Elvira Elena Morales Castillo

Esma de Señorita Morales:

Por medio de la presente estamos informando los resultados de Analisis Quimicos efectuados, segun detalle:

RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICOS

TIPO DE MUESTRA: Agua Residual
 FECHA DE TOMA DE MUESTRA: Desconocida
 FECHA DE FINALIZACION DEL ANALISIS: 18-09-2001
 PROCEDENCIA DE LA MUESTRA: Aguas de proceso de Añil
 TIPO DE TOMA DE MUESTRA: Desconocida
 MUESTRA TOMADA POR: Desconocida
 APARIENCIA DE LA MUESTRA: Verde amarillenta, oscura

| <u>ANALISIS</u> | <u>Método</u> | <u>Resultado</u> | <u>Incerteza</u> | <u>Expresado como</u> |
|-----------------------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------|
| SOLIDOS SEDIMENTABLES | 1 | 0.1 | No aplica | ml/L |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES | 1 | 324.3 | ± 10.1 | ppm |
| DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO | 1 | 11274.3 | ± 279.7 | ppm O ₂ |
| TURBIDEZ | 1 | 262.5 | ± 0.0 | Unidades NT |
| COLOR | 3 | 7000.0 | ± 0.0 | Unidades Pt-Co |
| SULFATOS | 1 | 137.9 | ± 1.9 | ppm SO ₄ |

Espinaldada Industrial, S.A. de C.V. Calle Central, Miami No. 171, Tel.: 228-7125, 228-1216 y 228-1900, Fax: (503) 228-4320, San Salvador, El Salvador, C.A.

PAGINA 2/2

CODIGO 620S

NOTAS:

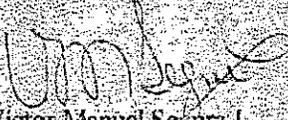
| | | |
|--------------------------|--------------------------------|-----|
| ND | No Detectable | |
| ppm | mg/L | |
| Metodologías de Análisis | APHA-AWWA-WEF | (1) |
| | ESPINSA, VALIDADO | (2) |
| | ORBECO ANALYTICAL SYSTEMS, INC | (3) |

Los resultados corresponden a la muestra indicada en procedencia y en código. La reproducción parcial de este documento debe ser autorizada por el Laboratorio.

Agradeciendo su atención a la presente, nos suscribimos de usted.

Atentamente,

ESPECIALIDADES INDUSTRIALES, S. A. DE C. V.


Lic. Victor Manuel Segura L.
Químico Industrial
Jefe de Laboratorio Químico



Nuestro Laboratorio cuenta con un Sistema de Calidad fundamentado en la Norma NSR EN 45001, con el fin de proporcionar a nuestros clientes garantía y seguridad en los resultados y está Acreditado por el CONACYT en Análisis de Aguas bajo el Registro No RLA-13-01-99

ANEXO J

ANÁLISIS QUÍMICO DE HOJAS DE JIQUILITE AGOTADAS

INSTITUTO SALVADOREÑO DE INVESTIGACIONES DEL CAFE
 Santa Tecla, El Salvador, C.A.
 Teléfono: 28-0490, 28-0694

Fecha 10 de diciembre 1984

Estimado(a) señor(a) Sra. Daisy de Marinero
 Atentamente estamos enviándole los resultados de los análisis efectuados en las muestras foliares que usted nos remitió con fecha

Informe No. _____

Nombre de la finca: Propietario: Sra. Daisy de Marinero Cantón: Municipio: Departamento:

| No. Lab. | Identificación | MACRONUTRIENTES (%) | | | | | | | MICRONUTRIENTES (ppm) | | | |
|----------|--------------------|---------------------|-------|---|------|-------|-------|------|-----------------------|------|------|----|
| | | N | P | K | Ca | Mg | S | B | Fe | Cu | Zn | Mn |
| 1-221 | Hojas de Jiquilite | 26.88% | 0.260 | | 3.41 | 0.545 | 0.207 | 61.5 | 28.7 | 12.5 | 1.50 | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |



Sra. María Isabel de Muñoz
 CAFE Depto. de Química Agrícola

COMENDACIONES:

ANEXO K

CUADRO DE COSTOS PROVISIONAL. COSTOS DE PRODUCCIÓN DE JIQUILITE (AÑIL) INDIGOFERA SP. 2^{DO} AÑO – MANTENIMIENTO DE LA PLANTACIÓN – 1 MZ

CUADRO DE COSTOS PROVISIONAL

COSTOS DE PRODUCCION DE JIQUILITE (AÑIL) Indigofera sp.

2do. Año - Mantenimiento de la plantación - 1 mz.

| Concepto | Clase | Cantidad | Valor unitario | Valor total | \$ | % |
|-------------------------------------|--------|----------|----------------|-----------------|---------------|---|
| A. Mano de obra | | | | | | |
| Aplicación de herbicidas (2) | Jornal | 8.00 | 30.00 | 240.00 | 27.43 | |
| Control de malas hierbas manual (3) | Jornal | 30.00 | 30.00 | 900.00 | 102.86 | |
| 1a Cosecha de material | Jornal | 30.00 | 30.00 | 900.00 | 102.86 | |
| 2a Cosecha de material | Jornal | 33.00 | 30.00 | 990.00 | 113.14 | |
| Sub-total A | | | | 3,030.00 | 346.29 | |
| B. Insumos o materiales | | | | | | |
| Herbicida | Litros | 10.00 | 42.00 | 420.00 | 48.00 | |
| Sub-total B | | | | 420.00 | 48.00 | |
| TOTAL A+B | | | | 3,450.00 | 394.29 | |

| | | |
|------------------------------------|-----------|-----------|
| | Libras | Kilos |
| Rendimiento estimado de biomasa | 23,625.00 | 10,738.64 |
| Rendimiento estimado de indigo | 52.34 | 28.33 |
| Contenido de indigotina estimado % | 57.00 | |
| Precio estimado por kilo \$ | 49.88 | |
| Precio total \$ | 1,413.16 | |

ANEXO L

RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS REALIZADOS A LAS AGUAS DE DESECHO PROVENIENTES DEL ANÁLISIS DE INDIGOTINA



San Salvador, 18 de Septiembre de 2001

Señores
PROYECTOS AGRO INDUSTRIAS, GTZ
 Trabajo de Graduación Anil
 Universidad de El Salvador
 Presente

NUMERO DE PAGINAS DE REPORTE 1/2
CODIGO DE MUESTRA 621S
FECHA DE RECIBO DE MUESTRA 12-09-2001
ATENCION Elvira Elena Morales Castillo

Estimado Señorita Morales,

Por medio de la presente estamos informando los resultados de Analisis Quimicos efectuados, según detalle:

RESULTADOS DE ANALISIS QUÍMICOS

TIPO DE MUESTRA Agua Residual
FECHA DE TOMA DE MUESTRA Desconocida
FECHA DE FINALIZACION DEL ANALISIS 18-09-2001
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA Analisis de Indigotina
TIPO DE TOMA DE MUESTRA Desconocida
MUESTRA TOMADA POR Desconocida
APARIENCIA DE LA MUESTRA Azul oscura

| <u>ANALISIS</u> | <u>Método</u> | <u>Resultado</u> | <u>Incerteza</u> | <u>Expresado como</u> |
|-----------------------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------|
| SOLIDOS SEDIMENTABLES | 1 | ND | No aplica | mL/L |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES | 1 | 1664.5 | ± 125.2 | ppm |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO | 1 | 83.5 | ± 0.0 | ppm O ₂ |
| TURBIDEZ | 1 | 29.5 | ± 0.7 | Unidades NT |
| COLOR | 5 | 5500.0 | ± 0.0 | Unidades Pt-Co |
| SULFATOS | 1 | 192103.2 | ± 0.0 | ppm SO ₄ |

Especialidad: Industrias, S.A. de C.V. Calle Sábana Santa No. 071, Tel.: 225-7753, 225-7216 y 225-1500, FAX: (503) 225-4350, San Salvador, El Salvador, C.A.