

Portafolio preliminar de  
Buenas Prácticas Operacionales  
para el cumplimiento de la norma  
de emisiones





# Presentación

Este documento contiene un portafolio preliminar de Buenas Prácticas Operacionales-BPO, enfocado a mejorar la eficiencia y control de los sistemas de generación de vapor de las plantas de beneficio del sector palmero, y por consiguiente a una reducción de sus emisiones de material particulado.

En el año 2012, Fedepalma contrató un estudio con la firma CAIA Ingeniería para recopilar información técnica de soporte para presentar una propuesta de modificación de la norma de emisiones al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

El estudio concluyó que las plantas de beneficio estarían en capacidad de cumplir con el estándar de  $300 \text{ mg/m}^3$  para instalaciones existentes, con la adopción de un conjunto de BPO que mejorara la eficiencia de sus calderas y, en general, de todo su sistema de generación de vapor.

A finales de 2012, Fedepalma contrató un nuevo estudio con CAIA Ingeniería con dos propósitos: i) construir el portafolio de BPO aplicables al sector para este propósito; y ii) validarlo mediante su aplicación en seis plantas piloto.

Esta cartilla muestra los resultados del primero de ellos. Una vez concluido el estudio piloto de validación del portafolio, publicaremos un nuevo documento con sus resultados aplicables para las demás plantas de beneficio del sector.

Este documento fue desarrollado por la Unidad de Planeación Sectorial y Desarrollo Sostenible de Fedepalma, bajo el liderazgo de Edna Katherin Ibarra León, Analista Ambiental. El contenido técnico fue desarrollado por Marcelo Hernández y Alexander Valencia de CAIA Ingeniería.

Esperamos que este documento, cuyo contenido es de gran calidad técnica, contribuya a una mayor eficiencia energética y cumplimiento de la normatividad ambiental en las plantas de beneficio, dos aspectos fundamentales de la sostenibilidad que queremos para nuestra agroindustria.

# Contenido

1. Introducción .....	5
2. Eficiencia y control del sistema de generación de vapor para la reducción de emisiones .....	8
2.1 Controles primarios y secundarios de emisiones .....	9
2.2 Variables primarias de control .....	10
2.3 Consignas de control .....	10
2.4 Variables, Consignas y Buenas Prácticas: del QUÉ al CÓMO .....	12
3. Portafolio de BPO aplicables para el sistema de generación de vapor de las plantas de beneficio de aceite de palma .....	15
3.1 Listado general de BPO .....	16
3.2 Combustible .....	20
3.3 Control de la combustión .....	23
3.4 Oxígeno .....	24
3.5 Operación del sistema de generación de vapor .....	25
3.6 Ingeniería .....	27
3.7 Sistemas de control de emisiones .....	28
4. Implementación de las BPO en seis plantas piloto del sector palmero .....	29
4.1 Selección de las seis plantas piloto .....	30
4.2 Diagnóstico .....	32
4.3 Plan de Trabajo para la implementación de las BPO .....	33

# 1. Introducción



Desde mediados de 2008, las plantas de beneficio del sector palmero están reguladas por la Resolución 909 de 2008 expedida por el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Esta norma reglamenta las emisiones de contaminantes de fuentes fijas, incluidos los equipos de combustión externa que utilicen biomasa como combustible como los utilizados en las plantas de beneficio de aceite de palma.

En la Tabla 1 se muestran los estándares de emisión aplicables a las plantas de beneficio del sector palmero.

**Tabla 1.** Estándares de emisión admisibles para equipos de combustión externa existentes que utilicen biomasa como combustible a condiciones de referencia (25 °C, 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 13%.

Tipo de combustible	Capacidad de producción de vapor (t/h)	Tipo de instalación <sup>1</sup>	Estándares de Emisión Admisible (mg/m <sup>3</sup> )	
			MP	NOx
Biomasa	Todos	Nueva	50	350
		Existente	300	350

Debido a la dificultad que han tenido las plantas de beneficio de aceite de palma en Colombia de cumplir con estos estándares, Fedepalma estructuró y contrató un estudio con la firma CAIA Ingeniería Ltda durante los años 2011 y 2012, para caracterizar las emisiones atmosféricas de una muestra representativa de 16 plantas de beneficio del sector, y analizar la viabilidad técnica y financiera de cumplir con los estándares de la citada norma.

Para ello, el estudio identificó y analizó las principales prácticas empleadas actualmente para la operación de los sistemas de generación de vapor y control de emisiones en las plantas de beneficio; y el efecto de dichas emisiones sobre la calidad del aire.

En cuanto a las instalaciones existentes, el estudio concluyó que las plantas de beneficio del sector palmero están en capacidad de cumplir con el es-

1 La Resolución 909 de 2008 establece que una instalación existente es aquella que estaba construida y operando a la fecha de entrada en vigencia de la norma, es decir el 15 de julio de 2008. Una instalación nueva es aquella que entró a operar posteriormente a esta fecha. Para el caso de las fuentes fijas de emisión objeto de la norma, la instalación no hace referencia a la planta de beneficio sino a la caldera, que es la fuente puntual de emisiones atmosféricas.

tándar de emisión de material particulado  $300 \text{ mg/m}^3$  siempre y cuando implementen Buenas Prácticas Operacionales-BPO encaminadas a mejorar la eficiencia y el control de su sistema de generación de vapor y de los sistemas de control de emisiones que tuviesen instalados.

Teniendo en cuenta lo anterior, a finales de 2012 Fedepalma contrató un nuevo estudio con la firma CAIA Ingeniería Ltda., que tiene dos objetivos principales:

- 1. Diseñar un portafolio de Buenas Prácticas Operacionales (BPO)** aplicables a las plantas de beneficio del sector palmero para mejorar la eficiencia de sus sistemas de generación de vapor y reducir sus emisiones de material particulado.
- 2. Validar esta propuesta de BPO en 6 plantas piloto**, con el fin de identificar aquellas con mayor potencial de reducción de emisiones.



Esta cartilla presenta los resultados asociados al primero de estos objetivos. El capítulo 2 presenta algunos elementos teóricos acerca del proceso de combustión de biomasa, enfatizando aquellas variables que deben ser monitoreadas y controladas para garantizar una combustión completa y por lo tanto una reducción en los niveles de emisión. Al final de este capítulo se hace referencia a la relación entre estas variables a controlar y las categorías de BPO que se identificaron para el portafolio.

El capítulo 3 presenta el portafolio de 33 BPO, con una breve descripción de cada una de ellas y algunas ayudas visuales para su mejor comprensión. Finalmente, el capítulo 4 introduce los elementos clave que se tendrán en cuenta para el estudio piloto de validación de las BPO en las 6 plantas piloto. Este estudio continuará durante el segundo semestre de 2013, y a finales de este año se espera publicar sus resultados, de tal forma que puedan ser replicables en las plantas de beneficio del sector palmero a nivel nacional.

## 2. Eficiencia y control del sistema de generación de vapor para la reducción de emisiones



## 2.1 Controles primarios y secundarios de emisiones

Las emisiones de material particulado de un proceso de combustión de biomasa, como el que se utiliza en los sistemas de generación de vapor de las plantas de beneficio, están directamente relacionadas con la eficiencia y el grado de control que se tenga sobre dicho sistema. En otras palabras, una mayor eficiencia y control en el sistema de generación de vapor permitirá **prevenir** o **disminuir** la generación de emisiones de material particulado.

Por otra parte, las plantas de beneficio cuentan con sistemas de control de emisiones atmosféricas, cuya función es **evitar** que las emisiones generadas lleguen a la atmósfera. Los sistemas de control de emisiones tradicionalmente utilizados en el sector palmero son los ciclones y multiciclones. Recientemente se han instalado sistemas más eficientes de control de emisiones como precipitadores electrostáticos y filtros de mangas, para cumplir con los estrictos estándares de emisión de material particulado para instalaciones nuevas ( $50 \text{ mg/m}^3$ ). Lo anterior deriva en dos tipos de mecanismos que se pueden implementar en las plantas de beneficio para reducir sus emisiones a la atmósfera: controles primarios y controles secundarios de emisiones, los cuales se explican a continuación.

### a. Controles primarios de emisiones

Implementación de BPO en las **calderas y el sistema de generación de vapor en general**, para prevenir o reducir la generación de emisiones del proceso.

### b. Controles secundarios de emisiones

Implementación de BPO en los **sistemas de control de emisiones**, que buscan la remoción del material particulado de los gases una vez han dejado la caldera; corresponden a acciones sobre equipos como ciclones, multiciclones, filtros de manga o precipitadores electrostáticos.



## 2.2 Variables primarias de control

Los controles primarios de emisiones se logran principalmente actuando sobre la combustión de la biomasa como tal, y sobre las variables involucradas en este proceso.

El **objetivo primordial** es lograr una **combustión completa de la biomasa**. En la medida en que se logre una combustión completa de la biomasa, la eficiencia y el control sobre el proceso serán óptimos, y se minimizará la generación de emisiones de material particulado.

Para lograr una combustión completa es necesario establecer un estricto control de las siguientes cuatro variables primarias:

**Temperatura** de combustión suficientemente alta

**Turbulencia:** mezcla adecuada de aire y combustible en la cámara, de manera que no existan zonas de combustión localizadas ricas en combustible o lo contrario.

**Tiempo** de residencia suficientemente largos para asegurar una combustión completa del combustible.

**Oxígeno:** existencia suficiente y generalizada de oxígeno disponible para la combustión. Se debe evitar que existan zonas del hogar con altos contenidos de oxígeno o lo contrario.

Teniendo en cuenta que la Resolución 909 de 2008 establece la necesidad de hacer una corrección del nivel de emisiones según el porcentaje de oxígeno, se propuso una quinta variable que es necesario controlar: el **nivel de oxígeno en los gases de escape**, para evitar elevados valores que dificulten el cumplimiento de la norma.

## 2.3 Consignas de control

Las cuatro variables primarias de control enunciadas en la sección anterior pueden ser afectadas por numerosos procesos o elementos del sistema de generación de vapor de una planta de beneficio.

En esta sección se enumeran 11 consignas de control, que abarcan los principales aspectos o procesos del sistema de generación de vapor que pueden influir en las variables primarias de control.

Las consignas de control pueden influenciar más de una variable de control. Por ejemplo, si la humedad del combustible aumenta, se gastará más energía para su evaporación durante la combustión; esto bajará la temperatura dentro de la cámara de combustión, y podrá disminuir el oxígeno disponible.

A continuación se describirán brevemente las 11 consignas de control principales para los sistemas de generación de vapor de las plantas de beneficio del sector palmero:

- 1. Temperatura de la cámara:** la temperatura de combustión es la variable más importante a controlar para lograr una combustión completa, debido a su influencia exponencial en las tasas de reacción. El tiempo de residencia necesario para una combustión completa está directamente influenciado por la temperatura de combustión y por el tiempo de mezcla.
- 2. Relación de aire y combustible:** en las aplicaciones de combustión de biomasa, es necesario tener una relación de aire/combustible superior a 1 para asegurar una mezcla con aire suficiente. En aplicaciones a pequeña escala la tasa de aire en exceso tiene que estar por encima de 1,5.
- 3. Tamaño de combustible:** el tamaño de las partículas del combustible juega un papel importante en la eficiencia de la combustión. Un tamaño pequeño de partícula requiere menos esfuerzo para hacer combustión y por tanto resulta en un menor tiempo de residencia en el hogar de la caldera.
- 4. Humedad de la biomasa:** en aplicaciones de combustión por lotes, la humedad varía continuamente a medida que avanza la quema. Cuando existen variaciones en la humedad y composición del combustible, existen también variaciones en la temperatura de combustión.
- 5. Estratificación del aire:** mediante la aplicación de aire estratificado de combustión, es posible reducir simultáneamente tanto las emisiones procedentes de la combustión incompleta, como las emisiones de NOx. Las emisiones procedentes de la combustión incompleta se reducen debido a al aumento de la temperatura y a que se reduce el tiempo de residencia necesario.
- 6. Distribución de aire:** una distribución eficiente del aire en la cámara de combustión es de suma importancia para lograr una reducción efectiva de las emisiones. Ello influye en la calidad de la mezcla de aire y com-

bustible, y por lo tanto en el tiempo de residencia y la temperatura necesaria de combustión.

- 7. Alimentación de combustible:** el sistema de alimentación que se emplee tiene una incidencia directa en el resultado y eficiencia de la combustión. Con el fin que el proceso de combustión sea controlado, se debe garantizar que el ingreso de combustible sea permanente y corresponda a las necesidades reales y estequiométricas de generación de vapor para el proceso.
- 8. Instrumentación y Control:** se han desarrollado varios métodos diferentes para el control del proceso de combustión, basados en mediciones de gases de combustión o sus temperaturas.
- 9. Capacitación y regulación:** en las calderas de biomasa, el operario tiene una importancia fundamental en la calidad de la combustión y en el consumo de combustible. La adecuada capacitación del operario y su continuidad tienen, por lo tanto, una consecuencia preponderante en el control de emisiones.
- 10. Mantenimiento:** las labores de mantenimiento, deshollinado y limpieza de las calderas tienen una gran relevancia en su operación y, consecuentemente, en la calidad de sus emisiones.
- 11. Proceso e ingeniería:** la propia naturaleza del proceso productivo de las plantas de beneficio implica que los consumos no puedan ser constantes, obligando a que la generación de vapor tenga picos de consumo muy altos y condiciones transitorias de generación de vapor que incrementan significativamente el nivel de emisiones.

## 2.4 Variables, Consignas y Buenas Prácticas: del QUÉ al CÓMO

En la sección 2.3 se mencionó que el principal objetivo para mejorar la eficiencia del sistema de generación de vapor y reducir la generación de material particulado es garantizar una combustión completa. También se describieron cinco variables primarias de control para lograrlo. Por su parte, en la sección 2.4 se describieron 11 consignas de control relacionadas con los aspectos prioritarios a controlar de los elementos o procesos del sistema de generación de vapor.

Los anteriores aspectos están relacionados con **QUÉ** queremos lograr

El siguiente paso es establecer **CÓMO** lograrlo

Para ello, se ha definido un portafolio de Buenas Prácticas Operacionales (**BPO**), que buscan actuar sobre las **Consignas de control** y, de esa manera, influir sobre las **Variables primarias de control**.

Las BPO pueden actuar sobre más de una consigna de control, y como ya se explicó, las consignas de control pueden a su vez influir más de una variable de control. En este sentido, no es posible establecer una relación única y directa entre BPO, consignas y variables de control. Sin embargo, una combinación adecuada de BPO puede actuar sobre múltiples consignas y variables de control, y de esa manera mejorar significativamente la eficiencia de la combustión (y del sistema de generación de vapor) y reducir sus emisiones de material particulado.

El portafolio contempla 6 categorías de BPO:

- 1. Combustible:** BPO enfocadas a mejorar la calidad del combustible empleado, su dosificación, alimentación y distribución en el hogar.
- 2. Control de la combustión:** BPO enfocadas principalmente a medir y controlar la temperatura de la combustión, y a controlar la entrada y calidad de aire primario y secundario.
- 3. Oxígeno:** BPO enfocadas a garantizar un exceso adecuado de oxígeno para la combustión y a evitar la entrada de aire en el sistema de escape de gases.
- 4. Operación del sistema de generación de vapor:** BPO enfocadas a garantizar una adecuada operación de la caldera por parte de los operarios, una adecuada relación entre la demanda y la oferta de vapor y un óptimo diseño de redes y de los procesos del sistema de generación de vapor.
- 5. Ingeniería:** BPO enfocadas a garantizar un adecuado diseño de ingeniería y mantenimiento del sistema de generación de vapor.
- 6. Sistemas de control de emisiones:** BPO enfocadas a garantizar una operación eficiente de los sistemas de control de emisiones instalados en la planta.

La relación entre las categorías de BPO y las consignas y variables de control se muestra en la Figura 1. En el capítulo 3 se describirán en detalle todas las BPO que se han propuesto en las seis categorías arriba mencionadas.



## QUÉS



## CÓMOs



### Variables primarias de control

Turbulencia  
Oxígeno para la combustión  
Temperatura  
Tiempo  
Oxígeno en gases de escape

### Consignas de control

1. Temperatura de la combustión
2. Relación aire/combustible
3. Tamaño del combustible
4. Humedad del combustible
5. Estratificación de aire
6. Distribución de aire
7. Alimentación de combustible
8. Instrumentación y regulación
9. Capacitación y regulación
10. Mantenimiento
11. Procesos e ingeniería

### Categorías de BPO

- a. Combustible
- b. Control de la combustión
- c. Oxígeno
- d. Operación del sistema de generación de vapor
- e. Ingeniería
- f. Sistema de control de emisiones

**Figura 1.** Relación entre categorías de BPO, consignas y variables de control.

### 3. Portafolio de BPO aplicables para el sistema de generación de vapor de las plantas de beneficio de aceite de palma



### 3.1 Listado general de BPO

En el contexto del estudio realizado por CAIA Ingeniería Ltda. para Fedepalma, se considera como **Buena Práctica Operacional (BPO)** a aquella implementación, solución o procedimiento que mejora la eficiencia (p.e. el consumo energético) o el desempeño ambiental de los sistemas de generación de vapor de las plantas de beneficio, y cuyo nivel de inversión máximo es aquel que corresponde al presupuesto normal destinado al mantenimiento en cada planta. Cuando el valor de la inversión es superior a dicho monto, las soluciones se considerarán un cambio tecnológico, no cubierto dentro del alcance de dicho estudio.

Las BPO propuestas no se limitan a los equipos de generación de vapor, sino que abarcan todos los elementos de la planta de beneficio que incidan en el nivel de emisiones contaminantes; por ejemplo, el diseño de los procesos de producción, los sistemas de control de emisiones o los sistemas de generación eléctrica, entre muchos otros. Tampoco se limitan a las calderas sino que abarcan todo el sistema de generación de vapor.

Como ya se mencionó en la sección 2.5, se han identificado seis categorías de BPO aplicables a los sistemas de generación de vapor de las plantas de beneficio del sector palmero. Estas categorías agrupan un total de 33 BPO, que se presentan en la Tabla 2.

La tabla ha sido organizada según las seis categorías de BPO. La numeración de la BPO incluye primero la letra asignada a cada categoría y luego un número (A1, A2,... B1, B2,..., etc). Para cada BPO, se han identificado las consignas de control sobre las que actúa y las variables primarias de control que puede llegar a influir.

En las secciones 3.2 a 3.7 se describirán en detalle cada una de las BPO, por categorías.

**Tabla 2.** Listado general de BPO por categoría.

No.	BPO	Consignas de Control sobre las que actúa la BPO	Variables primarias de control que puede influir la BPO
<b>A. COMBUSTIBLE</b>			
<b>A1</b>	Cálculo del combustible requerido	Proceso e Ingeniería Relación Aire/Combustible Temperatura de la Combustión Capacitación y regulación	Temperatura Tiempo Oxígeno
<b>A2</b>	Mejora del combustible	Relación Aire/Combustible Tamaño del combustible Humedad de la Biomasa Temperatura de la Combustión	Temperatura Tiempo Oxígeno
<b>A3</b>	Reducción de la humedad	Humedad de la Biomasa Temperatura de la Combustión	Temperatura Tiempo Oxígeno
<b>A4</b>	Alimentación continua de combustible	Alimentación del Combustible Relación Aire/Combustible	Temperatura Tiempo
<b>A5</b>	Distribución homogénea de combustible en el hogar	Alimentación del Combustible Relación Aire/Combustible Temperatura de la Combustión	Temperatura Tiempo Oxígeno
<b>B. CONTROL DE LA COMBUSTIÓN</b>			
<b>B1</b>	Instalación de medidores de temperatura en la cámara	Temperatura de la Combustión Alimentación de combustible Capacitación y regulación Instrumentación y control	Temperatura
<b>B2</b>	Definición de temperatura de operación	Temperatura de la Combustión Capacitación y regulación	Temperatura Tiempo
<b>B3</b>	Corregir aislamientos de la cámara	Temperatura de la Combustión Relación Aire/Combustible	Temperatura Tiempo Oxígeno

No.	BPO	Consignas de Control sobre las que actúa la BPO	VARIABLES primarias de control que puede influir la BPO
<b>B4</b>	Precalear aire primario	Temperatura de la Combustión	Temperatura Tiempo
<b>B5</b>	Instalar aire secundario de cortina	Temperatura de la Combustión Estratificación del Aire	Temperatura Turbulencia Tiempo
<b>B6</b>	Flujo uniforme de aire primario	Distribución del Aire Relación Aire/Combustible	Turbulencia Oxígeno
<b>B7</b>	Variación de velocidad de aire primario, secundario y combustible	Relación Aire/Combustible Alimentación de combustible Instrumentación y control	Temperatura Tiempo Oxígeno

### C. OXÍGENO

<b>C1</b>	Determinar exceso ideal de aire para condiciones actuales	Relación Aire/Combustible Alimentación de combustible Temperatura de la Combustión	Temperatura Oxígeno
<b>C2</b>	Eliminación de entradas de aire en el sistema de escape	Proceso e Ingeniería	Oxígeno Normatividad
<b>C3</b>	Instalación de sensor de oxígeno en los gases de salida	Instrumentación y Control Relación Aire/Combustible Capacitación y regulación	Oxígeno Normatividad

### D. OPERACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR

#### a) OPERARIOS

<b>Da1</b>	Continuidad de los operarios	Capacitación y Regulación Alimentación de combustible	Normatividad Temperatura Oxígeno
<b>Da2</b>	Entrenamiento en variables de combustión	Capacitación y Regulación Relación Aire/Combustible Alimentación de combustible	Normatividad Temperatura Oxígeno

No.	BPO	Consignas de Control sobre las que actúa la BPO	VARIABLES primarias de control que puede influir la BPO
<b>Da3</b>	Estandarización de operaciones para evitar apertura de compuertas	Temperatura de la Combustión Relación Aire/Combustible Alimentación de combustible Capacitación y regulación	Turbulencia Temperatura Tiempo Oxígeno

### b) OPERACIONES

<b>Db1</b>	Rediseño de las operaciones de consumo	Proceso e Ingeniería Alimentación de combustible Capacitación y regulación	Temperatura
<b>Db2</b>	Operación continua de la producción	Proceso e Ingeniería	Temperatura
<b>Db3</b>	Establecimiento de una caldera de base y otras de soporte	Temperatura de la Combustión Proceso e Ingeniería	Temperatura
<b>Db4</b>	Comunicación entre proceso y consumo	Proceso e Ingeniería Alimentación de combustible Capacitación y regulación Relación Aire/Combustible	Temperatura Oxígeno

### c) REDES DE VAPOR

<b>Dc1</b>	Revisión y rediseño de redes de vapor	Proceso e Ingeniería	Temperatura Oxígeno
<b>Dc2</b>	Rediseño y cambio de trampas de vapor	Proceso e Ingeniería Mantenimiento	Temperatura Oxígeno
<b>Dc3</b>	Uso de condensados para precalentar agua de caldera	Proceso e Ingeniería Alimentación de combustible	Temperatura Oxígeno

## E. INGENIERÍA

<b>E1</b>	Programa de limpieza y des-hollinado semanal	Mantenimiento Alimentación de combustible Capacitación y regulación	Temperatura Tiempo
-----------	--	---	-----------------------

No.	BPO	Consignas de Control sobre las que actúa la BPO	VARIABLES primarias de control que puede influir la BPO
E2	Implementación de programa de mantenimiento por desempeño	Mantenimiento Capacitación y regulación	Temperatura Oxígeno
E3	Instrumentación y registro de variables de proceso de vapor	Instrumentación y Control Alimentación de combustible	Temperatura Oxígeno
E4	Automatización de los sistemas de alimentación de combustible y aire	Instrumentación y Control Alimentación de combustible	Turbulencia Temperatura Oxígeno
E5	Rediseño de los ductos de escape de gases	Proceso e Ingeniería	Normatividad Tiempo
E6	Detener la entrada de agua al hogar	Temperatura de la Combustión Humedad de la biomasa Estratificación del aire	Turbulencia Temperatura Oxígeno

### F. SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES

F1	Evaluación permanente del desempeño del sistema de control	Mantenimiento Proceso e Ingeniería	Oxígeno Normatividad
F2	Eliminación de entradas de aire en el sistema de control	Mantenimiento Proceso e Ingeniería	Oxígeno Normatividad

## 3.2 Combustible

Esta primera categoría contempla 5 BPO enfocadas a mejorar la calidad del combustible empleado, su dosificación, alimentación y distribución en el hogar. Ellas se describen a continuación.

**A1. Cálculo del combustible requerido.** Antes de realizar cualquier intervención en la planta, es necesario validar en terreno las condiciones de diseño del sistema de vapor y calcular la cantidad de combustible que realmente se requiere. La alimentación de la cantidad óptima de biomasa a la caldera es

la mayor garantía del control de emisiones. Para llevar a cabo el cálculo de combustible se debe:

1. Calcular la curva del sistema de vapor de la planta, mediante un medidor de caudal de vapor saturado, o mediante cálculos teóricos basados en el proceso.
2. Calcular la capacidad de producción de vapor de cada una de las calderas.
3. Determinar la capacidad calorífica del combustible a usar, dependiendo de la mezcla de biomasa.
4. Calcular la cantidad de combustible requerido. *Después de este punto, es necesario tener en cuenta cada cambio importante en las variables de la combustión.*

**A2. Mejora del combustible.** Las partículas pequeñas de combustible necesitan un tiempo de residencia más corto en el hogar y tienen una mayor superficie activa, por lo cual se debe preferir este tamaño de combustible para facilitar una combustión completa. Es necesario realizar una mezcla permanente de cuesco y material fino a la fibra para mejorar las características del combustible. Se recomienda hacer un desarrollo mecánico que permita separar el material fino y seco en línea para después dosificarlo a la fibra. En la Figura 2 se muestra cómo una variación en la velocidad de un tornillo sin fin de una planta permite obtener material fino con mayor o menor humedad.



**Figura 2.** Muestra de combustible fino, seco y húmedo de una misma línea de proceso.

**A3. Reducción de la humedad.** Un menor contenido de humedad del combustible implica una mayor temperatura de combustión y por ende menos emisiones contaminantes. Algunas plantas han implementado chaquetas de

secado en el *rompetortas*, bien sea con el vapor excedente o con los gases de salida de la chimenea, llegando a obtener humedad en el combustible hasta de 17%. En el corto plazo, es posible para las plantas implementar sistemas de secado naturales del combustible, empleándolo únicamente días después de su producción.

**A4. Alimentación continua de combustible.** Se recomienda suspender la alimentación manual de combustible en las plantas que aún la conserven. Se debe implementar alimentación por tornillo o por compuertas temporizadas, que si bien no es completamente automática, sí es continua. El tiempo de apertura de las compuertas debe poderse modificar dependiendo de las condiciones del proceso, particularmente de la relación aire/combustible. En el mediano plazo, se debe procurar una alimentación tipo tornillo, con variación de velocidad que permita la dosificación de combustible dependiendo de la temperatura de la cámara y del requerimiento de vapor. Este cambio de alimentación de combustible debe mantener su relación con el aire, por lo cual el ventilador de aire primario debe contar también con variador de velocidad, comandado por la señal del variador de la alimentación de combustible.



**Figura 3.** Compuertas de alimentación de biomasa.

**A5. Distribución homogénea de combustible en el hogar.** Mediante la calibración de los sistemas mecánicos de alimentación de combustible, se debe evitar que se presente acumulación de biomasa en cualquier parte del lecho, pero sobre todo en la entrada del hogar de la caldera. Este procedimiento debe ser automático para evitar que algún operario deba abrir las compuertas del hogar de la caldera, práctica que impacta de manera significativa el nivel de emisiones. La Figura 4 muestra una adecuada distribución de combustible en el hogar.



**Figura 4.** Adecuada distribución del combustible en la parrilla.

### 3.3 Control de la combustión

Esta segunda categoría contempla 7 BPO enfocadas a medir y controlar la temperatura de la combustión, y a controlar la entrada y calidad de aire primario y secundario. Ellas se describen a continuación.

**B1. Medición de temperatura.** Es indispensable instalar sensores de temperatura en el hogar de la caldera (temperatura de llama). Este sensor debe ubicarse en un sitio en el cual se tenga una lectura promedio del hogar y no en puntos fríos o calientes; es posible ubicar este sensor en los gases de salida, antes de los elementos de control de emisiones, cuya lectura está directamente relacionada con la temperatura en la cámara.

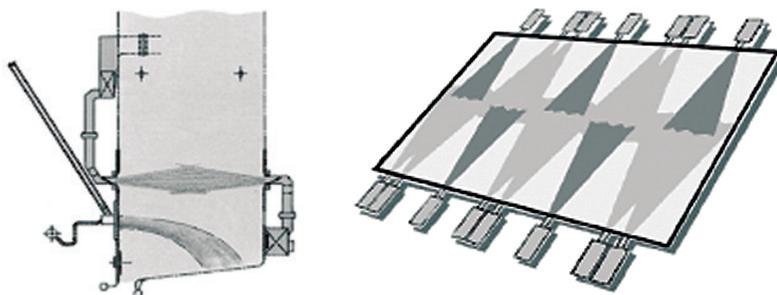
**B2. Definición de temperatura de operación.** En cada caldera, se debe definir la temperatura de gas efluente a partir de la cual se considera que ella estaría bajo una operación normal. Esta se debe estimar directamente en la caldera como la mínima temperatura a la que se logra una combustión estable.

**B3-B4. Maximización de la temperatura del hogar.** Se deben tomar todas las medidas que sean necesarias para incrementar la temperatura de operación en el hogar de manera que siempre sea al menos igual a la temperatura mínima de operación establecida en la anterior BPO. Para ello se recomienda revisar permanentemente todos los aislamientos (ver Figura 5), corregir los defectuosos y en el mediano plazo, evaluar el uso de recubrimientos cerámicos. Es importante también precalentar el aire primario de combustión, para lo cual se puede usar el calor de los gases de la combustión antes de los ciclones o el vapor generado por la caldera.



**Figura 5.** Revisión del estado de los aislamientos.

**B5. Aire secundario de cortina.** Esta técnica, también conocida como “aire superior”, tiene por objetivo mantener la combustión en la parte inferior del hogar, aumentar la permanencia del combustible en el hogar, mejorar la turbulencia y evitar la salida de inquemados; adicionalmente, logra reducir las necesidades de mantenimiento y limpieza de los pirotubos. Debe ser implementada dentro de la cámara, con reguladores de velocidad en las entradas de aire (dampers), que permitan calibrar y fijar en terreno la cantidad requerida del mismo (ver Figura 6).



**Figura 6.** Instalación típica de un sistema de aire secundario de cortina.

**B6. Flujo uniforme de aire primario.** Se debe asegurar que los sistemas de inyección de aire primario garanticen un flujo uniforme de entrada para la combustión homogénea en todas las zonas de la cámara, para permitir que exista exceso de oxígeno suficiente sobre toda la parrilla y evitar combustión incompleta en zonas determinadas.

**B7. Variación de velocidad de aire primario, secundario y combustible.** En el mediano plazo, es necesario implementar soluciones para mantener el control de la combustión mediante la variación de la velocidad tanto de aire primario como de combustible, dependiendo de la demanda de vapor momentánea. Para ello, es necesario obtener o calcular las curvas de trabajo de los ventiladores y tener instalados sensores de temperatura de la cámara y de oxígeno en los ductos de escape.

### 3.4 Oxígeno

Esta tercera categoría contempla 3 BPO enfocadas a garantizar un exceso adecuado de oxígeno para la combustión y a evitar la entrada de aire en el sistema de escape de gases. Ellas se describen a continuación.

**C1. Exceso de oxígeno en la cámara.** Para obtener una combustión completa es necesario garantizar una cantidad suficiente de oxígeno disponible en la zona de combustión primaria en la parte baja del hogar. En el mediano plazo, es necesario determinar de manera práctica el exceso ideal de aire (conocido comúnmente como índice I) que se debe aplicar para las condiciones particulares del proceso, para minimizar así las emisiones.

**C2. Eliminación de entradas de aire en el sistema de escape.** Una vez que los gases de combustión dejan la cámara de combustión, se debe asegurar que no haya entradas de aire en todo el recorrido hasta la chimenea, sobre todo en los sistemas de tiro inducido. Estos aislamientos deben incluir las salidas de evacuación de cenizas de los mecanismos de control de emisiones. Es necesario para ello, instalar sistemas de esclusas giratorias que garanticen un sello permanente. Algunas plantas han logrado diseños interesantes mediante el uso de materiales económicos en las zonas de desgaste y otros más resistentes en el resto del mecanismo.

**C3. Instalación de sensores de oxígeno en los gases de salida.** La medición en línea del nivel de oxígeno en los gases de salida tiene dos objetivos principales: por un lado, sirve para evaluar permanentemente el comportamiento de la combustión, verificando la presencia de exceso de aire; Y por otro lado, permite evaluar permanentemente la entrada de aire sobre los elementos posteriores a la cámara de combustión, tales como ductos y elementos de control.

### 3.5 Operación del sistema de generación de vapor

Esta cuarta categoría contempla 10 BPO enfocadas a garantizar una adecuada operación de la caldera por parte de los operarios, una adecuada relación entre la demanda y la oferta de vapor y un óptimo diseño de redes y de los procesos del sistema de generación de vapor. Ellas están divididas en tres subcategorías (operarios, operaciones y redes de vapor), y se describen a continuación.

**Da1-Da2. Continuidad y capacitación de los operarios.** Los operarios son los responsables de asegurar que las calderas sean operadas adecuadamente, reduciendo así las emisiones contaminantes. Muchas plantas han comprobado que la continuidad de los mismos implica un avance en la homogeneidad del proceso de combustión. Se debe entrenar periódicamente a los operarios en los parámetros que inciden directamente en la combustión y

que tienen que ver con las emisiones contaminantes: temperatura, combustible y oxígeno.

**Da3. Minimizar operaciones en el hogar.** Uno de los procedimientos que más impacta las emisiones de material particulado es la apertura de las puertas del hogar para operaciones de movimiento y limpieza del combustible. Se debe evitar esta actividad al máximo, mediante el control de todas las variables del proceso mencionadas.

**Db1. Rediseño de las operaciones.** Una dificultad importante que se presenta es que la naturaleza del consumo y necesidades de vapor no son continuas. Se debe propender por una planeación más estable del proceso que implique volver los consumos lo más homogéneos posible. Dado que el momento de mayor consumo de vapor es durante el llenado de los esterilizadores, se debe programar la producción de manera que jamás coincidan dos llenados simultáneamente, o con otros procesos intensivos de consumo de vapor.

**Db2. Operación continua de la producción.** Algunas plantas han incorporado con éxito un esquema de trabajo continuo con jornadas de 24 horas; esta práctica minimiza las operaciones de encendido de la caldera, que por su inestabilidad producen mayor contaminación y ensuciamiento de los piro tubos.

**Db3-Db4. Coordinación de la producción con la generación de vapor.** Es importante que las plantas que cuentan con más de una caldera, una vez calculada su capacidad, temperatura mínima de operación y condiciones de consumo de vapor, mantengan una de ellas como caldera de base. Esta caldera estaría encendida todo el tiempo en operación estable y en su mejor punto de operación para sostener los requerimientos permanentes de vapor. Las otras calderas se mantendrían en condición variable para operar en los momentos pico de consumo.

**Dc1-Dc2. Optimización de las redes y consumos.** Es fundamental revisar en el corto plazo los diseños de las redes de vapor y consumos de las plantas de beneficio. Algunas de las plantas presentan escasez de vapor debido a su crecimiento; por ello, deben asesorarse de personas expertas en temas de distribución de vapor para su rediseño.

**Dc3. Uso de los condensados.** Una vez mejoradas las redes y trampas de vapor, es indispensable empezar a usar los condensados que no contengan material orgánico para calentar el agua de caldera. Esta medida de eficien-

cia energética implica una importante disminución en los requerimientos de combustible, disminuyendo por lo tanto las emisiones contaminantes.

## 3.6 Ingeniería

Esta quinta categoría contempla 6 BPO enfocadas a garantizar un adecuado diseño de ingeniería y mantenimiento del sistema de generación de vapor. Ellas se describen a continuación.

**E1. Limpieza y deshollinado semanal.** En la medida de lo posible, se debe realizar y cumplir una planeación semanal de las labores de deshollinado y limpieza de las calderas para aprovechar las paradas programadas de producción. Varias plantas han incorporado esta práctica y han reportado mejoras sustanciales en su nivel de emisiones.

**E2. Mantenimiento por desempeño.** El departamento de ingeniería debe generar un programa de mantenimiento preventivo de las calderas, ductos, redes de vapor, aislamientos y trampas. Adicionalmente, es posible usar la información de la instrumentación instalada para determinar los momentos de hacer mantenimientos por desempeño. Este es el caso de los sensores de oxígeno, que permiten detectar entradas excesivas de aire, o de los sensores de temperatura que permiten saber en qué momento ha bajado demasiado la eficiencia en la transferencia de calor de los piro tubos.

**E3. Instrumentación de variables de proceso.** En la actualidad, la mayoría de las plantas solamente usa la señal de presión de la línea de vapor como retroalimentación al proceso. Esta señal tiene el inconveniente de que le muestra al usuario el momento en que la producción de vapor ya es insuficiente y por lo tanto el sistema ya ha entrado en una condición inestable. Para mantener una combustión completa es necesario mantener una vigilancia permanente de la temperatura del hogar y la cantidad de aire en exceso a través de sensores de oxígeno. Para procesos más sofisticados es posible analizar, adicionalmente, concentraciones de CO y  $C_xH_y$ .

**E4. Automatización del proceso.** El objetivo principal de un proceso automatizado es ajustar la producción de calor en la caldera según la demanda de calor del proceso. Para procesos más estables, es posible instalar sensores de oxígeno a la salida de los gases de combustión, que deben permitir controlar la proporción de aire/combustible del sistema mediante variadores de velocidad en aire primario, aire secundario y alimentación de combustible.

## 3.7 Sistemas de control de emisiones

Esta sexta y última categoría contempla 2 BPO enfocadas a garantizar una operación eficiente de los sistemas de control de emisiones instalados en la planta. Ellas se describen a continuación.

**F1. Evaluación permanente del desempeño.** Ninguno de los sistemas de control de emisiones evaluados cuenta con medición de variables que permitan verificar su desempeño, por lo que no es posible identificar si su operación es adecuada. Esto hace que no se conozca la eficiencia de los sistemas de control de emisiones ni se cumpla con lo establecido en la reglamentación vigente.

**F2. Eliminación de entradas de aire.** Una vez se cuente con un sistema de medición de la caída de presión en el sistema de control de emisiones (ciclón o multicyclón), se debe contar con un procedimiento de verificación de entradas de aire que garantice el adecuado funcionamiento de estos sistemas, y eliminar permanentemente posibles entradas de aire.

## 4. Implementación de las BPO en seis plantas piloto del sector palmero



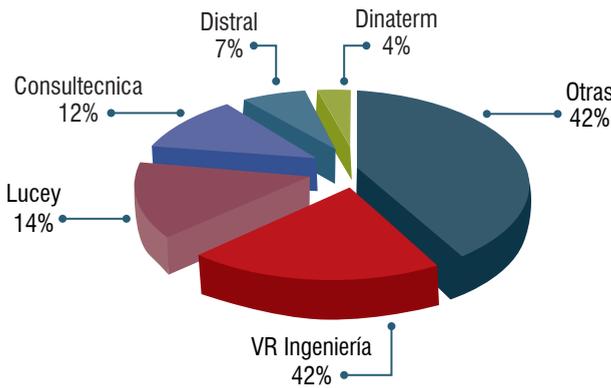
El desarrollo de este estudio piloto contempla las siguientes cuatro fases, las cuales serán explicadas en las secciones subsiguientes:

1. Selección de seis plantas piloto representativas
2. Diagnóstico detallado de las seis plantas piloto
3. Elaboración de un Plan de Trabajo para la implementación de BPO
4. Evaluación de resultados

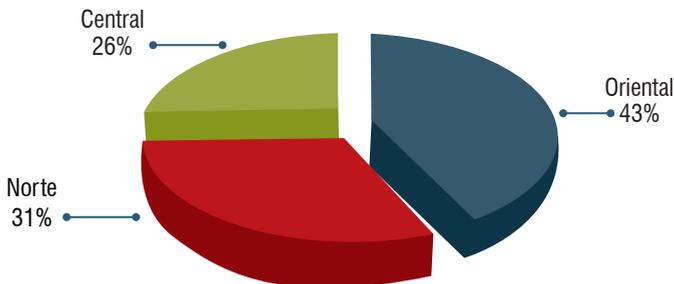
## 4.1 Selección de las seis plantas piloto

Se utilizaron 7 criterios para seleccionar las seis plantas piloto para la implementación de BPO. Teniendo en cuenta que cada caldera es considerada como una fuente fija en el marco de la norma de emisiones, la selección fue de seis calderas y sistemas de generación de vapor, y no de seis plantas de beneficio.

- Representatividad dentro del universo de calderas existentes en el sector



- Representatividad de las zonas palmeras del país.





- Clasificación como “instalaciones existentes” según la Resolución 909 de 2008.
  - Incidencia en las emisiones del sector: se dio preferencia a las calderas que estuvieran permanentemente en operación, sobre las que se utilizan como respaldo o cuya operación es poco frecuente.
- 
- Disposición de la alta gerencia y del equipo técnico de las plantas de beneficio, en la implementación de las Buenas Prácticas Operacionales a través de un plan de trabajo establecido durante el proyecto.
  - Tamaño de la planta de beneficio. Dado que el estudio busca que la implementación de BPO sea replicable en todos los tamaños de planta, se seleccionaron plantas de diferentes tamaños.
  - Viabilidad técnica para realizar las mediciones de material particulado de manera simultánea antes y después del sistema de control de emisiones.

En la Tabla 3 se muestran las seis calderas seleccionadas para este estudio piloto.

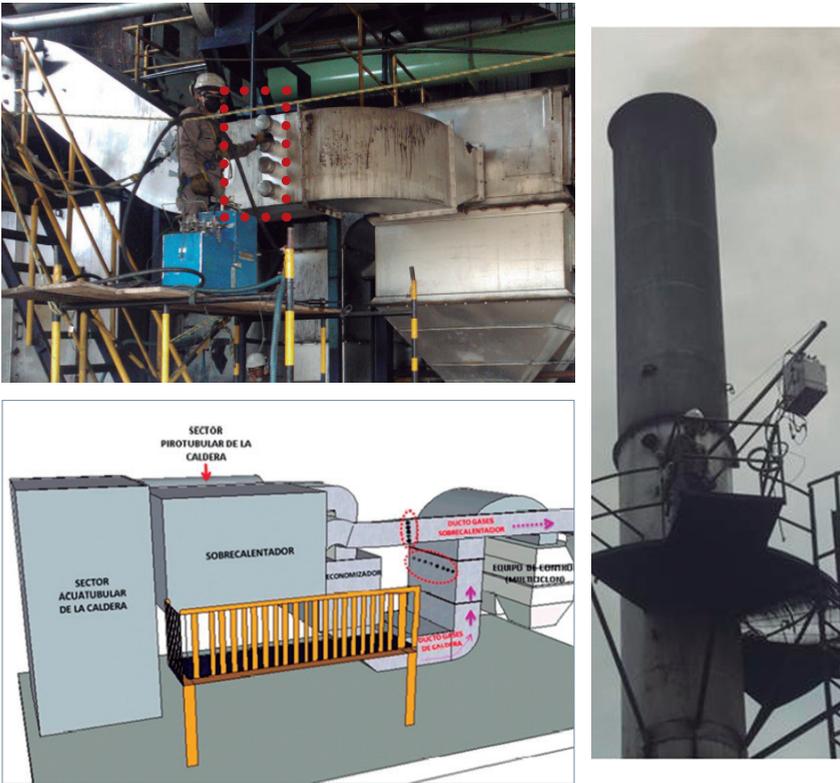
**Tabla 3.** Calderas piloto seleccionadas para la implementación de BPO.

Zona	Empresa	Marca	Tipo	Capacidad nominal (t/h)	Sistema de control	Clasif.
Central	Agroince Ltda.	Lucey	Mixta	3,17	Ciclón	20
Norte	C.I. Tequendama S.A.	Consultecnica	Mixta	6	Damper	7
Norte	Aceites S.A.	VR Ingeniería	Pirotubular	12,48	Ciclón	37
Oriental	Entrepalmas S.A.	VR Ingeniería	Mixta	10	Ciclón	32
Oriental	Inversiones La Mejorana Ltda.	VR Ingeniería	Mixta	2,81	Ciclón	2
Oriental	El Palmar del Llano S.A.	VR Ingeniería	Mixta	15	Multiciclón	31

## 4.2 Diagnóstico

Durante los meses de febrero y marzo de 2013 se realizó un diagnóstico integral a las seis plantas de beneficio piloto. Este diagnóstico contempló los siguientes dos aspectos:

- I. **Medición de emisiones de material particulado**, antes y después del sistema de control de emisiones instalado. Esta doble medición simultánea permitió evaluar la eficiencia del sistema de control de emisiones. Las mediciones fueron realizadas por la Compañía de Consultoría Ambiental, acreditado ante el IDEAM para este tipo de mediciones (ver Figura 7).



**Figura 7.** Muestreo simultáneo de material particulado antes y después del sistema de control.

- II. **Visita de diagnóstico**, por parte de expertos en sistemas de combustión y eficiencia energética de la firma CAIA Ingeniería Ltda, con el acompañamiento de profesionales del Área Ambiental de Fedepalma y del Programa

de Procesamiento de Cenipalma. En esta visita se revisaron los sistemas de generación de vapor y los sistemas de control de emisiones, en relación con las variables primarias de control y las consignas de control explicadas en las secciones 2.2 y 2.3.

En la Figura 8 a continuación se muestra, con carácter ilustrativo, los resultados de las mediciones realizadas en una de las seis plantas piloto.

En este tipo de mediciones se pueden analizar aspectos como los siguientes:

- El alto contenido de material particulado ( $4.048 \text{ mg/m}^3$ ) y de CO (6.246 ppm) a la salida de la caldera (en la tabla se muestra como entrada del sistema de control), evidencia una combustión incompleta.
- Se observa una concentración de oxígeno excesivamente alta a la salida del sistema de control (13,0%), bastante mayor a la que sale de la caldera (8,9%). Esto evidencia entradas indeseadas de aire en el sistema de escape, lo que dificultará el cumplimiento normativo.
- La eficiencia de retención de material particulado del sistema de control de emisiones utilizado (81,8%) está dentro de los rangos esperados para este tipo de equipos (mayor al 80%), aunque podría llegar a ser mayor.

El diagnóstico detallado de cada una de las seis plantas piloto contempló un análisis como estos acerca de las mediciones de material particulado realizadas, así como un análisis de lo observado en la visita en torno a las variables y consignas de control.

### **4.3 Plan de Trabajo para la implementación de las BPO**

El Plan de Trabajo que se construirá con cada una de las plantas piloto responderá a las fortalezas, debilidades y oportunidades encontradas alrededor de las variables y consignas de control, y estará constituido por un paquete de BPO prioritarias a implementar en un plazo de 4 meses.

El cronograma de implementación de las BPO estará dividido en dos fases: en una primera fase de dos meses se implementará un primer grupo de BPO, y en una segunda fase de dos meses se implementarán las BPO restantes.

De esta manera, se podrán evaluar los resultados de implementación de las BPO con mediciones de material particulado al final del mes 2 y al final del mes 4. En la Tabla 4 se ilustra lo que podría ser una selección de BPO prio-

		CLIENTE	FEDEPALMA	
		UBICACIÓN		
<b>REPORTE DE PRUEBAS DE EFICIENCIA</b>		PRUEBAS	2	
<b>CICLÓN - CALDERA 2</b>		FECHA	FEBRERO 26 Y 27 DE 2013 - PROMEDIO	
ÍTEM	PARÁMETRO	UNIDADES	SALIDA DE GASES	ENTRADA DE GASES
1	PRESIÓN BAROMÉTRICA	mbar	988.88	988.88
2	PRESIÓN ABSOLUTA EN DUCTO	mbar	988.16	985.59
3	PRESIÓN DE MEDICIÓN	mbar	993.44	993.35
4	VOL. MUESTREO SECO. C. N.(0 °C, 1 ATM)	m <sup>3</sup>	1.29	1.29
5	CONTENIDO DE HUMEDAD	Bws	0.12	0.13
6	TEMPERATURA EN DUCTO	°K	524.19	589.15
7	TEMPERATURA EN MEDIDOR DE GASES	°K	314.97	315.84
8	VELOCIDAD DEL GAS C. DUCTO	m/s	11.12	15.07
9	CAUDAL DE GASES HUM C. DUCTO	m <sup>3</sup> /h	18,156.34	17,899.71
10	CAUDAL DE GASES HUM C.NORM	m <sup>3</sup> /h	9,221.65	8,068.78
11	CAUDAL DE GASES SECO C.NORM	m <sup>3</sup> /h	8,080.66	7,037.55
12	CONCENT. PARTÍCULAS EN GAS SEC. C. NORM	g/m <sup>3</sup>	0.80	4.41
13	CONCENT. PARTÍCULAS EN GAS HUM. C. NORM	g/m <sup>3</sup>	0.70	3.84
14	CONCENT. PARTÍCULAS EN GAS HUM.C.DUCTO	g/m <sup>3</sup>	0.36	1.74
15	EMISIÓN PARTIC. NORM. BASE. HUM	Kg/h	6.47	31.00
16	CONCENTRACIÓN PARTÍCULAS, CONDIC. REFERENCIA	mg/m <sup>3</sup>	734.90	4,048.85
17	<b>Eficiencia de retención de MP</b>		<b>81.8%</b>	
ANÁLISIS DE GASES				
ÍTEM	PARÁMETRO	UNIDADES	SALIDA DE GASES	ENTRADA DE GASES
1	CONCENTRACIÓN DE CO	ppm	1,003.3	6,246.5
2	CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub>	%	7.5	11.1
3	CONCENTRACIÓN DE O <sub>2</sub>	%	13.0	8.9

**Figura 8.** Resultado de una de las mediciones realizadas en las plantas piloto.

ritarias para las seis plantas piloto y su implementación en dos fases en los meses 1-2 y 3-4.<sup>2</sup>

Durante el segundo semestre del año 2013, las plantas de beneficio piloto implementarán las BPO acordadas en el Plan de Trabajo, cumpliendo un cronograma de ejecución acompañado y asesorado por CAIA Ingeniería, Fedepalma y Cenipalma. Se espera documentar los resultados obtenidos en este proceso, así como las lecciones aprendidas y recomendaciones generales que puedan ser aplicables a las demás plantas de beneficio del sector en torno a la mejora de sus sistemas de generación de vapor y control de emisiones atmosféricas.

2 Nota aclaratoria: los resultados del diagnóstico aún no se han socializado con las seis plantas piloto. Por consiguiente, no se ha concertado el Plan de Trabajo para la implementación de las BPO ni su cronograma de implementación. La Tabla 4 cumple un propósito meramente ilustrativo para este documento.



A person wearing a white protective suit and a cap is working in a laboratory or office setting. The person is leaning over a table, possibly handling equipment or samples. The background shows a complex structure of metal beams and pipes, suggesting a technical or industrial environment. The entire image is overlaid with a dark blue tint.

Federación Nacional de Cultivadores de  
Palma de Aceite, Fedepalma  
Carrera 10A N° 69A - 44  
Teléfono 313 8600  
Bogotá D.C., Colombia