

UCH-FC
Q. Ambiental
0668
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“Determinación del efecto de la Alimentación de Crudo y Combustibles
sobre las Emisiones de COT en Horno 1 Rotatorio de Clinker”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de
los requisitos para optar al Título de

Químico Ambiental

Evelyn Denisse Orellana Pino

Director Seminario de Título:

Sra. Marina Hermosilla

Profesor Patrocinante Seminario de Título:

M. Cs. Sylvia Copaja

Diciembre de 2011

Santiago – Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el o (la) candidato (a):

EVELYN DENISSE ORELLANA PINO

“DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA ALIMENTACIÓN DE CRUDO Y
COMBUSTIBLES SOBRE LAS EMISIONES DE COT EN HORNO 1
ROTATORIO DE CLINKER”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Sra. Marina Hermosilla

Director Seminario de Título

Handwritten signature in blue ink over a horizontal line.

Comisión de Evaluación Seminario de Título

M. Cs. Sylvia Copaja

Profesor Patrocinante

Handwritten signature in blue ink over a horizontal line.

Prof. Julio Hidalgo

Corrector

Handwritten signature in blue ink over a horizontal line.

Dr. Antonio Galdamez

Corrector

Handwritten signature in blue ink over a horizontal line.



Santiago de Chile, Diciembre de 2011



Nací en Santiago de Chile el 10 de Septiembre de 1985. Cursé mi enseñanza secundaria y media en el Liceo A N ° 1 “Javiera Carrera”, en donde el sentido libre y pluralista de la educación forjaron mi personalidad. En este lugar es donde comienza a nacer mi interés por las problemáticas medioambientales, participando activamente en la Academia de Ciencias Sociales entre los años 1999-2002. Siempre me caractericé por participar como delegada y presidenta de curso, llegando a ser el año 2002; vicepresidenta del centro de alumnas del liceo.

En el año 2004 ingresé a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile a estudiar Licenciatura en Ciencias Ambientales c/m en Química. Continuado con el espíritu crítico y participativo, fui consejera de la facultad en el año 2003.

Durante los años 2003-2006 trabajé en el Centro de Química Ambiental de la Facultad de Ciencias; llegando a presentar en el año 2007 dos trabajos de investigación en las V Jornadas Chilenas de Física y Química Ambiental: *“Impacto del MP fino durante los episodios críticos de MP10 en la Ciudad de Santiago”* y *“Formación de aerosoles orgánicos secundarios (AOS) en episodios críticos de material particulado en la Ciudad de Santiago”*.

Durante los años 2008-2009 desarrollé mi unidad de investigación en el Laboratorio Química de la Atmosfera de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas en torno a *“Estudio de los Aerosoles troposféricos de la Península Antártica”*; llegando a presentar en el año 2009 un trabajo de investigación en el V Congreso Latinoamericano de Física y Química Ambiental y las VI Jornadas Chilenas de Física y Química Ambiental: *“Análisis de Retrotrayectorias de Aerosoles Atmosféricos Antárticos MP3 Fraccionados”*.

El segundo semestre del año 2009 fui ayudante del Laboratorio del curso Química de Aguas, impartido por el profesor Mauricio Isaacs. Fue en este mismo año en que comencé a desarrollar mi seminario de título en la empresa Cemento Polpaico S.A. en torno a la *“Determinación del efecto de la Alimentación de Crudo y Combustibles sobre las Emisiones de COT en Horno 1 Rotatorio de Clinker”*. Paralelamente a la realización de mi seminario de título, durante el año 2010 - 2011 trabajé en ésta empresa coordinando el sistema de gestión ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004, además de colaborar con el sistema de gestión ambiental de la planta.



DEDICATORIA

A mi madre,

Que con su luz me acompañó durante este camino.

AGRADECIMIENTOS

A Cemento Polpaico S.A. por haberme permitido realizar este seminario en su empresa, en especial a mi directora de seminario Marina Hermosilla, quien me orientó constantemente hasta los últimos minutos.

A mis profesores de la universidad, en especial a mi profesora patrocinante Sylvia Copaja y profesores correctores Julio Hidalgo y Antonio Galdamez.

Agradezco a mis padres Jorge y Angélica por haberme entregado el amor, los valores y la educación para ser quién soy hoy. Además a Coke y Laurita por la paciencia y compañía en estos últimos años.

A mi familia, a mis amigas del liceo, a mis amigos de la universidad y a mis amigos de la vida; quienes me alentaron siempre a terminar esta etapa.

INDICE DE CONTENIDOS

I	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Normativa Asociada a los COT	1
1.1.1	Normativa Internacional	1
1.1.2	Normativa Nacional.....	4
1.2	Planteamiento del Problema	8
1.3	Definición de COT	10
1.4	Química de los COT	13
1.5	Fuentes de Generación de COT	15
1.6	Impactos producidos por COV	18
1.7	Sistemas de Medición de COT	19
1.8	Medidas de Abatimiento para COT	26
1.9	Descripción del Área de Estudio, Proceso de Productivo y Normativa Ambiental de Cemento Polpaico S.A.....	28
1.10	Revisión de Antecedentes.....	59
1.11	Objetivos.....	68
1.11.1	Objetivo General	68
1.11.2	Objetivos Específicos.....	68

II	MATERIALES Y MÉTODOS.....	69
2.1	Métodos de Análisis Químicos	69
2.1.1	Caracterización de ácido graso	69
2.1.2	Determinación de carbono orgánico total (COT) en materias primas y combustibles	72
2.1.3	Determinación de análisis elemental de combustibles.....	73
2.2	Muestreo de Ácido Graso, Materias Primas y Combustibles	73
2.3	Programa de Pruebas en Horno 1.....	82
2.4	Monitoreo de Emisiones de COT, Gases y Parámetros del Proceso.....	84
2.5	Medición de Gases de Combustión.....	84
2.6	Elaboración de Modelo para Balance de Masa de COT	86
III	RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	88
3.1.1	Análisis Cromatográfico de Acido Graso	88
3.1.2	Análisis COT Combustibles y Materias primas.....	90
3.1.3	Análisis Elemental de Combustibles.....	91
3.1.4	Monitoreo Emisiones de COT	92
3.1.5	Correlación de Emisiones de COT	98
3.1.6	Medición de Gases de Combustión.....	106
3.1.7	Balance de Masa de COT	107
IV	CONCLUSIONES	114
V	RECOMENDACIONES	115
VI	REFERENCIAS	116
VII	ANEXOS.....	120
7.1	Tablas	120
7.2	Figuras.....	122
7.3	Cálculos	123

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Valores Límites de Emisión para Co-incineración en Hornos de Cemento y Hornos Rotatorios de Cal.....	5
Tabla 2.	Condiciones de operación para incineración y co-incineración.....	6
Tabla 3.	Resultados de COT, COV y CH ₄ , durante el EV 2008 y EV 2009.....	9
Tabla 4.	Resumen de Resultados de Mediciones Continuas de Concentración y Tasa de Emisión de Gases a condiciones de 25 ° C y 1 atm., para Cemento Polpaico (17/04/2009) y Cemento Melón (7/11/2009).....	17
Tabla 5.	Factores Incidentes en la Calidad del Agua en el Estero Colina.....	31
Tabla 6.	Factores Incidentes en la Calidad del Agua en el Estero Lampa.....	31
Tabla 7.	Catastro Cumplimiento Normativa D.S.90/00 y D.S.46/02 - al 30 de Junio de 2011 en la Provincia de Chacabuco.....	32
Tabla 8.	Propiedades Fisicoquímicas del Ácido Graso (Oleina 200), componente principal del Fat-oil.....	40
Tabla 9.	Propiedades Fisicoquímicas del Agente Espumante (Montanol 800) ..	40
Tabla 10.	Abreviaciones de las principales fases del clinker.	46
Tabla 11.	Residuos que pueden y no pueden ingresar a la plataforma de acondicionamiento Coactiva.....	54
Tabla 12.	Condiciones de Operación en Horno 1 de Cemento Polpaico S.A.....	55
Tabla 13.	Masas Expelidas de Materias Primas y Reactivos del Proceso mediante Expulsion Test.....	65
Tabla 14.	Concentración de Emisiones para el Horno 1; normalizadas a 25 ° C, seco y 10 % de O ₂	66
Tabla 15.	Resumen Resultados Análisis Químicos y Expulsión Test.....	67
Tabla 16.	Frecuencia de Muestreo de Combustibles durante 24-25 de Marzo de 2010.....	75
Tabla 17.	Frecuencia de Muestreo de Combustibles y Materias Primas durante 24-28 de Septiembre de 2010.....	77
Tabla 18.	Descripción de Datos Operacionales durante el desarrollo del Programa de Pruebas en el Horno 1.....	82
Tabla 19.	Análisis de PCI y Cloro para Combustible Tradicional y Alternativos. ..	83
Tabla 20.	Rangos de Medición y Exactitudes de Gases de Combustión.	85
Tabla 21.	Concentración de Tipos de Acidos Grasos.....	89
Tabla 22.	Análisis de Contenido Orgánico en Muestras de Combustibles.....	90
Tabla 23.	Análisis de Contenido Orgánico en Muestras de Materias Primas.....	90
Tabla 24.	Análisis Elemental de Combustibles (petcoke, CSSg, CSSf y CSL), en base natural.....	91
Tabla 25.	Análisis Elemental de Combustibles (petcoke, CSSg, CSSf y CSL), en base seca.....	91
Tabla 26.	Parámetros Estadísticos de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 1.....	93
Tabla 27.	Datos Eliminados de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 2.....	94
Tabla 28.	Parámetros Estadísticos de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 2.....	94
Tabla 29.	Datos Eliminados de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 3.....	96
Tabla 30.	Parámetros Estadísticos de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 3.....	96

Tabla 31.	Parámetros Estadísticos de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 4.....	97
Tabla 32.	Parámetros Estadísticos de Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 1.....	100
Tabla 33.	Valor de Coeficiente de Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 1.	100
Tabla 34.	Parámetros Estadísticos de Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 2.....	102
Tabla 35.	Valor de Coeficiente de Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 2.	102
Tabla 36.	Parámetros Estadísticos de Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 3.....	104
Tabla 37.	Valor de Coeficiente de Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 3.	104
Tabla 38.	Parámetros Estadísticos de Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 4.....	106
Tabla 39.	Valor de Coeficiente de Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 4.	106
Tabla 40.	Resultados de Mediciones de Gases de Combustión en Tercer y Séptimo Piso de Torre Precalentadora.	107
Tabla 41.	Resumen de Mediciones de Gases de Combustión durante ejecución de Prueba 1, 2, 3 y 4.	107
Tabla 42.	Caudal de Gases Promedio durante ejecución de Pruebas 1, 2, 3 y 4.	109
Tabla 43.	Flujo Másico de COT en Entradas y Salidas de Modelo de Masa de COT.....	109
Tabla 44.	Cantidad de establecimientos según código CIUU presentes en la comuna de Tiltil. Año 2009.	120

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Evolución de las Emisiones de COT desde la Chimenea del Horno 1 en Planta Polpaico.....	9
Figura 2.	Diagrama de Muestreo de Gases.....	23
Figura 3.	Diseño de la Unidad de Análisis de un SMCE de Marca ABB.....	25
Figura 4.	Fotografía Satelital del Lugar de Emplazamiento de la Planta de Cemento Polpaico S.A.....	29
Figura 5.	Lugares de Monitoreo de Calidad de Aire, Red Macam-2.....	33
Figura 6.	Humedal de Batuco y El Roble, sitios prioritarios de conservación de la biodiversidad den la Provincia de Chacabuco RM.	35
Figura 7.	Proceso de Fabricación de Clinker y Elaboración de Cemento: Transporte y Trituración de Materia Prima.....	38
Figura 8.	Proceso de Fabricación de Clinker y Elaboración de Cemento: Elaboración de Pastas.....	41
Figura 9.	Proceso de Fabricación de Clinker y Elaboración de Cemento: Fabricación de Clinker.....	43
Figura 10.	Cantidad de Compuestos Químicos en función de la Temperatura, durante las Reacciones Químicas de Formación del Clinker.	46
Figura 11.	Proceso de Fabricación de Clinker y Elaboración de Cemento: Elaboración de Cemento, Ensacado y Despacho.....	51
Figura 12.	Puntos de Monitoreo de Calidad de Aire, Agua y Suelo.....	56
Figura 13.	Diagrama de Equipos utilizados en el Expulsion Test.....	60
Figura 14.	Cromatograma de la Muestra Colector Flotación.....	61
Figura 15.	Cromatograma de la Muestra Agente Espumante.....	62
Figura 16.	Comportamiento de la Expulsión de la Muestra del Colector Flotación.....	62
Figura 17.	Comportamiento de la Expulsión de la Muestra del Agente Espumante.....	63
Figura 18.	Comparación de las Expulsiones de COV de las Muestras de la Materia Prima antes del Proceso de Flotación (#110736 Alimentación Flotación Caliza, #110742 Alimentación Flotación Poroso; símbolos negros), de las Muestras después del Proceso de Flotación (#110737 Concentrado Flotación Caliza, #110743 Concentrado Flotación Poroso; símbolos grises), y de Muestras de Alimentación a Hornos (#110744 Queque Horno 1, #110745 Queque Horno 3; símbolos vacíos).	64
Figura 19.	Lugar de muestreo de Acido Graso, estanque 346 RT3.....	74
Figura 20.	Lugar de muestreo de Alimentación Petcoke al Horno 1, muestreador 454-TY1.....	77
Figura 21.	Lugar de muestreo de Alimentación CSSf al Horno 1, banda dosificadora 454-BD3.....	78
Figura 22.	Lugar de muestreo de Alimentación CSSg al Horno 1, banda dosificadora 454-BP1.....	78
Figura 23.	Lugar de muestreo de Alimentación CSL al Horno1.....	79
Figura 24.	Lugar de muestreo de alimentación flotación poroso.....	79
Figura 25.	Lugar de muestreo de alimentación flotación caliza.....	80
Figura 26.	Lugar de muestreo de concentrado flotación poroso.....	80
Figura 27.	Lugar de muestreo de concentrado flotación caliza.....	81
Figura 28.	Lugar de muestreo de Alimentación de Crudo al Horno 1, tolva 414-TL2.....	81

Figura 29.	Lugar de muestreo Clinker Horno 1, muestreador 481-TP1.....	82
Figura 30.	Equipo Analizador de Gases de Combustión, Testo 340.....	85
Figura 31.	Límites de Batería para Modelo de Balance de Masa de COT.	86
Figura 32.	Perfil de Acido Graso, Método de Cromatografía de Gas Capilar con Detector FID.	88
Figura 33.	Comportamiento de Emisiones de COT en Chimenea del Horno 1 durante ejecución de la Prueba 1.	92
Figura 34.	Comportamiento de Emisiones de COT en Chimenea del Horno 1 durante ejecución de la Prueba 2.	93
Figura 35.	Comportamiento de Emisiones de COT en Chimenea del Horno 1 durante ejecución de la Prueba 3.	95
Figura 36.	Comportamiento de Emisiones de COT en Chimenea del Horno 1 durante ejecución de la Prueba 4.	97
Figura 37.	Resumen de las Emisiones de COT durante ejecución de Pruebas en Horno 1.....	98
Figura 38.	Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de la Prueba 1.	99
Figura 39.	Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de la Prueba 2.	101
Figura 40.	Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de la Prueba 3.	103
Figura 41.	Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de la Prueba 4.	105
Figura 42.	Plano de Ubicación de Chimenea en Horno 1 de Planta Polpaico. 2009	122

LISTA DE ABREVIATURAS

COT:	Compuestos Orgánicos Totales
COV:	Compuestos Orgánicos Volátiles
COV'sB:	Compuestos Orgánicos Volátiles Biogénicos
COV'sNB:	Compuestos Orgánicos Volátiles No Biogénicos
ton/año:	Unidad de flujo, toneladas de gases o materiales en un año
HCM:	Hidrocarburos Metánicos
HCNM:	Hidrocarburos No Metánicos
SMCE:	Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones
AFR:	Alternative Fuels and Raw Materials
PRMS:	Plano Regulador Metropolitano de Santiago
L/s:	Unidad de flujo, litros en un segundo
µg/N m ³ :	Unidad de medida de concentración, un microgramo por metro cúbico en condiciones normales (1 atm y 25 ° C)
mg/N m ³ :	Unidad de medida de concentración, un miligramo por metro cúbico en condiciones normales (1 atm y 25 ° C)
SNASPE:	Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado
RCA:	Resolución de calificación ambiental
H-1:	Horno N ° 1 de elaboración de clinker
H-3:	Horno N ° 3 de elaboración de clinker
CS:	Combustibles de sustitución
MPA:	Materias primas alternativas
CSL:	Combustibles de sustitución líquidos
CSSg:	Combustibles de sustitución sólidos grueso
CSSf:	Combustibles de sustitución sólidos finos

RESUMEN

En la actualidad existe una gran cantidad de fuentes emisoras de Compuestos Orgánicos Totales (Metano y COV) a la atmósfera, los cuales se caracterizan por ser en su mayoría cancerígenos y precursores de ozono troposférico. Dentro de las fuentes que liberan este tipo de contaminantes a la atmósfera se encuentra a la industria de cemento, en particular a Cemento Polpaico quien durante el año 2009 emitió a la atmósfera 23,99 ton/año de COT.

Este trabajo se centra en realizar un análisis del contenido orgánico mediante un equipo Leco a muestras de materias primas y combustibles; se destaca la presencia de 0,19 % de COT en crudo, 0,09 % de COT en petocke, 22,04 % de COT en CSSf y 37,73 % de COT en CSSg. Además de caracterizar el ácido graso empleado en el proceso de flotación, mediante Cromatografía de Gas Líquido con Detector FID; encontrándose una gran cantidad de cadenas de hidrocarburos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados, dentro de los que destaca en abundancia el ácido palmítico (21,93 %).

Fue analizado el efecto de la alimentación de crudo y combustibles (tradicional y alternativos) sobre las emisiones de COT, mediante la ejecución de cuatro pruebas experimentales industriales en donde se correlacionaron estadísticamente algunos parámetros del proceso (alimentación de crudo, alimentación de combustible tradicional y alternativo, temperatura de sinterización y CO) con las emisiones de COT. La evolución de las emisiones de COT durante la ejecución de las cuatro pruebas fue estable, registrándose mediante un Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (SMCE), un promedio de 31,7 mg/N m³ de COT.

Considerando la ejecución de las pruebas bajo condiciones óptimas de operación para la combustión (niveles de oxígeno por sobre el 4 %), se puede decir que en las cuatro pruebas no existe una correlación directa entre las emisiones de COT y los parámetros del proceso. Además al realizar el balance de masa de COT se puede decir que supuestamente las emisiones de COT provienen principalmente de la materia prima utilizada para elaborar el clinker, ya que las reacciones de destrucción son mayores a las reacciones de formación ($0,619 + X_f = X_d$ en Prueba 1, $0,227 + X_f = X_d$ en Prueba 2, $0,423 + X_f = X_d$ en Prueba 3 y $0,223 + X_f = X_d$ en Prueba 4).

ABSTRACT

At the present time a great amount of Total Organic Compound radiant bodies exists (Methane and VOC) to the atmosphere, which are characterized by being in their majority cancerigenic and precursory of tropospheric ozone. Within the sources that release this type of polluting agents to the atmosphere is the industry of cement, in individual to Polpaico Cement that during year 2009 emitted to atmosphere 23,99 ton/año of COT.

This work is centered in making an analysis of the organic content by means of a Leco equipment to samples of prime matter s s and fuels; destac to the presence of 0,19 % of COT in crude, 0,09 % of COT in petocke, 22,04 % of COT in CSSf and 37,73 % of COT in CSSg. Besides to characterize used fatty acid in the flotation process, by means of Liquid Gas Chromatography with Detector FID; being a great amount of saturated hydrocarbon chains, mo noinsaturados and poliinsaturados, within which the palmítico acid emphasizes in abound company (21,93 %).

Was analyzed the effect of the crude feeding and combustible (traditional and alternative) on the COT emissions, by means of the execution of four industrial experimental tests in where some parameters of the process (feeding of crude, traditional and alternative fuel supply, temperature of sintering and CO) with the COT emissions were correlated statistically. The evolution of the emissions of COT during the execution of the four tests was stable, registering itself by means of a System Continuous Emission Monitoring (SMCE), an average of 31,7 mg/Nm³ of COT.

Considering the execution of the tests under optimal conditions of operation for the combustion (oxygen levels by on 4 %), it is possible to be said that in the four tests a direct correlation between the emissions of COT and the parameters of the process does not exist. In addition when making the balance of mass of COT can be said that supposedly the COT emissions come mainly from the raw material used to elaborate clinker, since the destruction reactions are greater to the formation reactions ($0,619 + X_f = X_d$ in Test 1, $0,227 + X_f = X_d$ in Test 2, $0,423 + X_f = X_d$ in Test 3 and $0,223 + X_f = X_d$ in Test 4).

I INTRODUCCIÓN

1.1 Normativa Asociada a los COT

1.1.1 Normativa Internacional

- Directiva del Parlamento y el Consejo de la Unión Europea relativa a la incineración de residuos (Directiva 2000/76/CE, 2000):

El 4 de Diciembre del 2000 se promulgó una ley tendiente a estandarizar las condiciones de operación de fuentes industriales con incineración y co-incineración de residuos, así como también a reglamentar las emisiones de ciertos contaminantes atmosféricos que provengan de este tipo de instalaciones.

Para el caso de las instalaciones de incineración y co-incineración las sustancias orgánicas en estado gaseoso y de vapor, expresadas como carbono orgánico total no deben sobrepasar los 10 mg/N m³ a las siguientes condiciones: temperatura 273 K, presión 101,3 kPa, 10 % de oxígeno y gas seco.

Además se resalta la siguiente idea: *“la autoridad competente podrá autorizar exenciones en los casos en que el COT y el SO₂ no procedan de la incineración de residuos”*.

En las instalaciones de incineración y co-incineración se realizarán las siguientes mediciones:

a) Mediciones continuas de las siguientes sustancias: NO_x, (siempre y cuando se establezcan valores límite de emisión), CO, partículas totales, COT's, HCl, HF, SO₂.

b) Mediciones continuas de los siguientes parámetros del proceso: temperatura cerca de la pared interna de la cámara de combustión o en otro punto representativo de ésta autorizado por la autoridad competente; concentración de oxígeno, presión, temperatura y contenido de vapor de agua de los gases de escape.

c) Como mínimo, dos mediciones anuales de metales pesados, dioxinas y furanos; no obstante, durante los 12 primeros meses de funcionamiento, se realizará una medición como mínimo cada tres meses. Los Estados miembros podrán fijar períodos de medición si han establecido valores límites de emisión para los hidrocarburos aromáticos policíclicos u otros contaminantes.

- Ordenanza sobre la protección del aire
(Consejo Federal Suizo, 2010):

El 15 de Julio del 2010 se promulgó la ordenanza sobre protección del aire cuyos objetivos son:

- a. Limitación preventiva las emisiones de las instalaciones que producen la contaminación del aire y, la incineración de residuos al aire libre.
- b. Normar los combustibles.
- c. Normar los límites de emisión de los contaminantes del aire.
- d. Establecer el procedimiento cuando la inmisión es excesivos.

Para el caso de las instalaciones de hornos para el tratamiento térmico con una potencia de calor de mas de 100 KW la materia orgánica en forma de gas expresada como carbón total no debe sobrepasar los 20 mg/N m³ a las siguientes condiciones: temperatura 0 ° C, presión 1013 mbar, 5 % de oxígeno y gas seco.

- Política Nacional de Tratamiento Térmico de Residuos Peligrosos de Sudáfrica (Departament of Environmental Affairs South Africa, 2008):

En el Acta N ° 59 del año 2008 del Departamento de Asuntos Medioambientales de Sudáfrica se establecen los estándares de emisión de aire para los establecimientos industriales que incineran residuos y para los establecimientos industriales que co-procesan AFR en la producción de cemento; siendo el estándar de emisión de COT para ambos de: 10 mg/N m³ a 10 % de oxígeno, 101,3 KPa, 273 K y gas seco.

Para ambos tipos de establecimientos industriales se exige que el monitoreo de COT sea con un sistema de monitoreo continuo y que la temperatura de los gases de salida de la chimenea se mantengan por debajo de 200 ° C.

Sin embargo, para el caso de los establecimientos que co-procesen AFR resalta la siguiente idea: *“Los límites para el COT o SO₂ no aplican cuando las elevadas emisiones resultan del combustible convencional o materias primas, por ejemplo: no desde el co-procesamiento de AFR, siempre desde las actuales emisiones de COT y SO₂ (como lo establece el seguimiento de la línea base) no son incrementadas por el co-procesamiento de AFR”.*

1.1.2 Normativa Nacional

En el año 2007 se decreta el Decreto Supremo N ° 45 que establece la norma de emisión para la incineración y co-incineración (Ministerio Secretaría General de Presidencia de la República de Chile, 2007).

Este decreto considera que en Chile se produce una gran cantidad de sustancias y materiales de distinto origen y tipo, que requieren un manejo técnico apropiado para que su eliminación no genere impactos negativos en el medio ambiente. Además se reconoce que la incineración y co-incineración reducen considerablemente el volumen y la peligrosidad de dichas sustancias y materiales siempre y cuando ésta se realice en instalaciones apropiadas para ello, debiendo considerar el tratamiento de las emisiones atmosféricas de compuestos tóxicos y, en algunos casos, cancerígenos.

En el artículo tercero, del título segundo del DS N ° 45, se establecen las cantidades máximas de partículas y gases permitidas en el efluente y las frecuencias de mediciones. Estas cantidades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Valores Límites de Emisión para Co-incineración en Hornos de Cemento y Hornos Rotatorios de Cal.

CONTAMINANTES	Valor Límite de Emisión (mg/Nm ³)
Material Particulado (MP)	50
Carbono Orgánico Total (COT) ⁽¹⁾	20 ⁽³⁾
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal (Hg)	0,1
Cadmio y sus compuestos, indicado como metal (Cd)	0,1
Berilio y sus compuestos, indicado como metal (Be)	0,1
Plomo y sus compuestos, indicado como metal (Pb)	1
Arsénico (As) + Cobalto (Co) + Níquel (Ni) + Selenio (Se) + Telurio (Te) y sus compuestos, indicado como elemento, suma total	1
Antimonio (Sb) + Cromo (Cr) + Manganeso (Mn) + Vanadio (V)	5
Compuesto inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico (HCl)	20
Compuestos inorgánico fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico (HF)	2
Benceno (C ₆ H ₆)	5
Dioxinas y Furanos TEQ ⁽²⁾	0,2 ng/Nm ³

(1) La autoridad competente autorizará exenciones a este límite en los casos en que el COT no provenga de las sustancias o materiales utilizadas como combustible. Para ello los titulares deberán presentar antecedentes fundados.

(2) TEQ: factor tóxico equivalente para mamíferos de la Organización Mundial de la Salud de 1998.

(3) Valor expresado como mgC/N m³

Es así como el valor máximo permitido de COT para la co-incineración en hornos de cemento y en hornos rotatorios de cal corresponde a 20 mgC/N m³ a condiciones de 10 % de oxígeno, presión de 101 KPa, temperatura de 25 ° C y gas seco.

Además se resalta lo siguiente: *“La autoridad competente autorizará exenciones a este límite en los casos en que el COT no provenga de las sustancias o materiales utilizadas como combustible. Para ello los titulares deberán presentar antecedentes fundados”.*

Este es el aspecto de la norma que da origen a este seminario de título: determinar el efecto de la alimentación de crudo y combustibles sobre las emisiones de COT en el Horno 1 de la Planta Polpaico, a fin entregar antecedentes fundados que

permitan evaluar a Cemento Polpaico S.A. la solicitud con la autoridad pertinente de exención al valor límite de emisión de COT.

En lo referido a la frecuencia de medición, el artículo quinto establece un periodo anual, sin perjuicio de ello, la medición de algunos parámetros deberá contar con un sistema de medición de tipo continuo en la chimenea de evacuación de gases de combustión, siendo ellos:

- Para instalaciones de incineración: Material particulado (MP-10), Monóxido de carbono (CO), Dióxido de azufre (SO₂) y Óxidos de nitrógenos (NO_x).
- Para los hornos de cemento y hornos rotatorios de cal que utilicen combustibles distintos a los combustibles tradicionales: Material particulado (MP-10).

En el artículo séptimo, del título tercero, se establecen las condiciones de operación de las instalaciones de incineración y co-incineración. Estas condiciones de operación se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Condiciones de operación para incineración y co-incineración.

Condición de operación	Incineración	Co-incineración
Temperatura mínima de los gases den la zona de combustión	850 ° C 1100 ° C si se procesan sustancias o materiales con más de 1 % de cloro en peso	850 ° C 1100 ° C si se procesan sustancias o materiales con más de 1 % de cloro en peso
Tiempo mínimo de residencia de los gases en la zona de combustión bajo la temperaturas señaladas	2 segundos	2 segundos

Se destaca en el artículo octavo del presente decreto que en las instalaciones de incineración y co-incineración que procesen sustancias o materiales que contengan

cloro deberán reducir al mínimo el tiempo de enfriamiento de los gases de emisión desde los 400 ° C hasta los 200 ° C.

En el artículo noveno, del título cuarto, se establece que la metodología de medición para carbono orgánico total es el Método 25-A "Determinación de los compuestos orgánicos volátiles totales mediante un analizador de ionización de llama".

Durante el año 2010 se realizó el proceso de revisión de ésta norma de incineración y co-incineración, con el fin de incorporar lo siguiente (CONAMA, 2010):

- Se ha detectado la existencia de elementos y sustancias cuyo uso como combustible está afecto a la norma de emisión de incineración y co-incineración, los cuales tienen como característica la de ser menos contaminantes que algunos combustibles tradicionales que no están afectados a la norma mencionada. Lo anterior hace necesario ampliar el listado de los combustibles tradicionales, de manera que la norma no se aplique a aquellos materiales o sustancias que, utilizadas como combustible, no generen emisiones riesgosas para la salud de la población o el medio ambiente.
- Nuevas definiciones en el cuerpo de la norma o modificar las definiciones existentes, a fin de permitir una mejor aplicación de este instrumento. Por ejemplo se agrega la definición de instalación forestal, con el fin de facilitar el uso de biomasa forestal no tratada en calderas forestales.
- Actualizar los métodos de medición de los contaminantes que regula la norma mencionada. Por ejemplo: CH-29 Determinación de emisiones de metales de fuentes estacionarias, CH-26 A Determinación de emisiones de halógenos y halegenuros de hidrógeno de fuentes estacionarias, CH-0030 Muestreo de

compuestos orgánicos volátiles y CH-23 Determinación de emisiones de dibenzo-dioxinas y dibenzo-furanos policlorados provenientes de residuos municipales.

El resto del cuerpo del decreto se mantiene inalterable, exceptuando las siguientes ideas:

-El plan de monitoreo deberá actualizarse cada vez que la instalación sufra alguna modificación y se deberá presentar el nuevo plan de monitoreo ante los servicios competentes respectivos.

-Se elimina el artículo transitorio relacionado con que las instalaciones existentes podrían solicitar eliminación o disminución en la frecuencia de monitoreo a aquellos parámetros en donde se demuestre el cumplimiento de los valores límites de emisión.

1.2 Planteamiento del Problema

A pesar que el DS 45/2007 se refiere a que las fuentes de co-incineración deben cumplir con el valor máximo de emisión mediante monitoreo discreto; las emisiones monitoreadas en continuo muestran un desempeño que supera el límite de la norma en forma regular.

En efecto, al observar la Tabla 3, se aprecia que los resultados de las emisiones discretas de COT expresado como carbono y corregidos al 10 % de oxígeno, durante la ejecución de los Ensayos de Verificación del año 2008 y 2009 fueron de 14,04 mg/N m³ para el año 2008 y 13,33 mg/N m³ para el año 2009.

Tabla 3. Resultados de COT, COV y CH₄, durante el EV 2008 y EV 2009. (Fuente: Informe Campaña de Mediciones 2009 Horno 1 Cemento Polpaico S.A. e Informe Test de Quema 2009 Horno 9 Cemento Melón)

Ensayo de Verificación (EV)	Condiciones*	Concentración corregida COT al 10% O ₂ [mg/Nm ³]	Concentración corregida COV al 10% O ₂ [mg/Nm ³]	Concentración corregida CH ₄ al 10% O ₂ [mg/Nm ³]
EV 2008 (10 Dic 2008)	64% Petcoke 16% Carbón 20% AF	14,04	11,98	2,06
EV 2009 (17 Abr 2009)	80%Petcoke 20% AF	13,33	11,79	1,55

* Condiciones de gas seco, 25°C, 1 atm.

Ambos valores nos dan cuenta que se cumple con el valor límite máximo de emisión de COT indicado en la norma de incineración y co-incineración DS 45/2007 (20 mg/N m³).

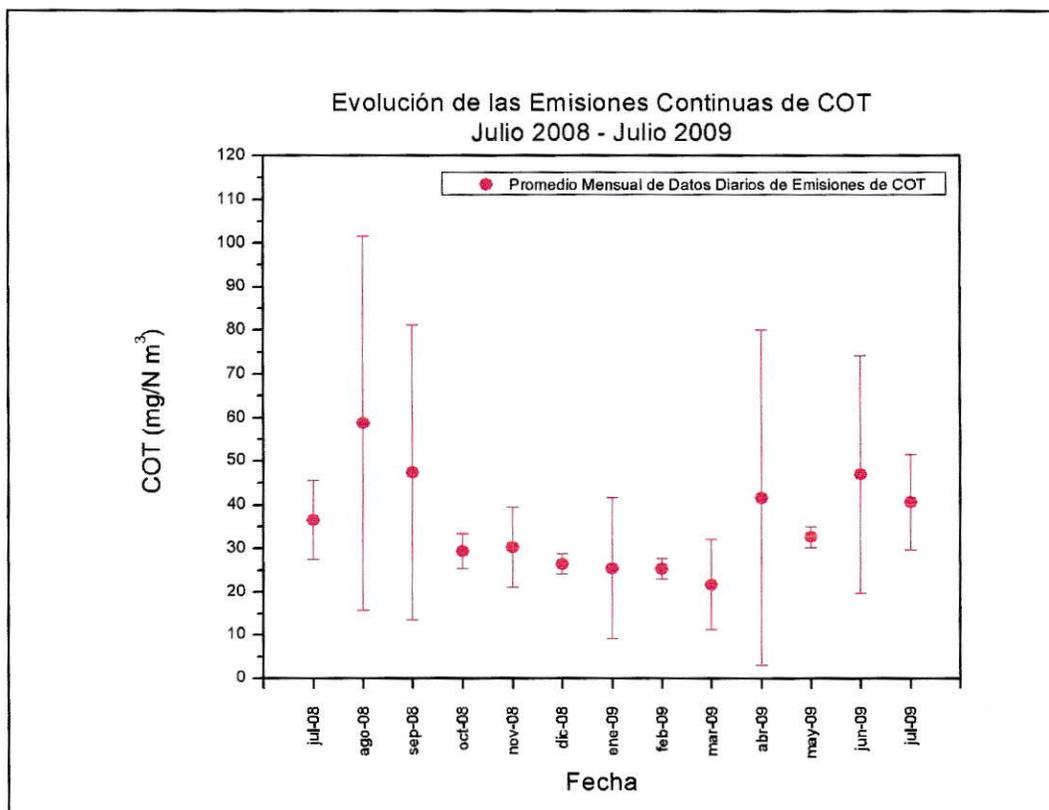


Figura 1. Evolución de las Emisiones de COT desde la Chimenea del Horno 1 en Planta Polpaico.

No obstante al observar la Figura 1, que muestra las emisiones continuas de COT desde Junio de 2008 hasta Junio de 2009, superan el valor límite máximo de emisión de COT indicado en el DS 45/2007 (20 mg/N m³).

Dada la situación descrita, Cemento Polpaico S.A. una empresa comprometida con el medio ambiente y vanguardista en el mercado, financia el siguiente estudio "Determinación del efecto de la Alimentación de Crudo y Combustibles sobre las Emisiones de COT en Horno 1 Rotatorio de Clinker", con el fin contar con antecedentes fundados que permitan determinar el origen de las emisiones de COT, a fin de aclarar si es posible solicitar a la autoridad competente exenciones al límite de COT establecido en el DS 45/2007.

1.3 Definición de COT

Los primeros compuestos de carbono fueron hallados en la materia viva, debido a eso, se les denominó compuestos orgánicos. En la naturaleza existe una gran cantidad de compuestos orgánicos, siendo los más importantes los constituidos por carbono e hidrógeno. Entre ellos se pueden encontrar presentes en organismos vivos como las proteínas y presentes como contaminantes atmosféricos como las dioxinas y furanos.

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) están conformado por las emisiones de origen natural (COV'sB) y/o antrópicas (COV'sNB), su balance en la atmosfera está conformado por las emisiones naturales y antrópicas; y además por su remoción de la atmósfera, en la mayoría de los casos, por reacciones fotoquímicas con oxidantes atmosféricos (Sanhueza y col., 2001).

Las emisiones de COV'sNB presentan el segundo mayor aporte de emisiones gaseosas contaminantes, después del monóxido de carbono (CO), y constituyen una de las fracciones del material particulado respirable (Morales, 2006).

Con respecto a las emisiones de COV'sB, en un estudio realizado sobre los factores de emisión de seis monoterpenos presentes en el peumo y en el pimienta (que corresponde al 2,5 % de las especies arbóreas de la Región Metropolitana de Chile) indica que son muy dependientes de las condiciones ambientales; teniendo cada uno de ellos diferentes reactividades químicas en la atmósfera con un potencial formador de ozono troposférico diferente a lo largo del día (Prendez, 2001).

Además, se ha encontrado que muchas de estas emisiones, en algunos lugares exceden las emisiones por fuentes antrópicas y juegan un papel significativo en la formación de ozono troposférico. Si bien se conoce claramente cual es el balance de los COV en la biósfera, no existe un consenso internacionalmente para definirlos.

De manera general los COV se definen como hidrocarburos que contienen carbono e hidrógeno y que se subdividen en alifáticos o aromáticos y compuestos orgánicos que pueden contener azufre, nitrógeno, oxígeno, cloro, bromo, flúor o yodo. Sin embargo; también se encuentran las siguientes definiciones de compuestos orgánicos volátiles (UDT, 2008):

- La legislación suiza en la Ordenanza sobre aranceles a pagar por emisiones de COV, define a éstos como "Aquellos compuestos orgánicos de al menos

0,1 mbar a 20 ° C o con un punto de ebullición de máximo 240 ° C a 1013,25 mbar (presión de vapor)".

- Perry y Gee en el año 1997, entienden por COV a "Cualquier sustancia orgánica liberada como vapor a la atmósfera, con potencialidad para causar efectos a bajas concentraciones".
- La USEPA define los COV como "Cualquier compuesto orgánico que participa en reacciones fotoquímicas en la atmósfera".

Además de todos los gases atmosféricos contaminantes agrupados en la sigla COV, existe otro contaminante atmosférico que posee un potencial relativamente alto de gas efecto invernadero, es el caso del metano con un potencial de calentamiento global de 23; esto significa que a un tiempo de 100 años cada Kg de CH₄ calienta la Tierra 23 veces más que la misma masa de CO₂. (Metano, 2011).

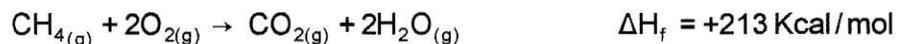
Para efectos de este estudio serán considerados los compuestos orgánicos totales (COT) como la suma de todas las sustancias orgánicas (CH₄ y COV) presentes en un gas a una presión de vapor mayor a 0,1 mbar y a 20 ° C (compuestos orgánicos volátiles).

$$\text{COT} = \text{CH}_4 + \text{COV} \quad (1)$$

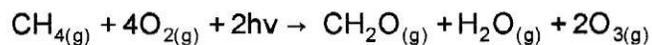
1.4 Química de los COT

Tal como fue explicado anteriormente los COT están compuestos por metano y COV, y dentro de la química del metano se puede mencionar que es un hidrocarburo saturado de cadena más corta existente, su punto de fusión es $-182,5$ ° C, su punto de ebullición es $-161,6$ ° C y su temperatura de autoignición es a 537 ° C; por lo tanto se encuentra en estado natural de forma gaseosa y es considerado como uno de los hidrocarburos más importantes desde el punto de vista de la contaminación atmosférica ya que favorece la formación de reacciones fotoquímicas. Posee un tiempo de residencia de 8 - 10 años en la atmósfera e influye en el calentamiento global.

La llama del metano es de color azul, debido a que la combustión con exceso de oxígeno es en general completa. El metano se oxida a CO_2 y H_2O pero si la combustión es incompleta se forma CO , H_2O y cenizas.



El metano puede formar compuestos halogenados y además es un importante precursor de ozono troposférico, tal como se indica en la siguiente ecuación (Hidrocarburos, 2011):

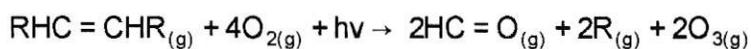
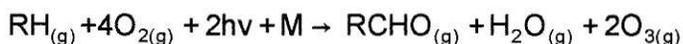


Por su parte, los COV son compuestos volátiles, liposolubles, tóxicos e inflamables; estas propiedades son las responsables de sus efectos sobre la salud y el medio ambiente. Las propiedades más relevantes de los COV son su volatilidad, que gobierna su emisión a la atmósfera; y su reactividad, que determina su tiempo de vida media en dicha atmósfera (Compuestos Orgánicos Volátiles, 2010).

La química de los COV ha sido estudiada por varios autores, principalmente en lo referido a los mecanismos de reacción que llevan a la producción de ozono troposférico y a la destrucción del ozono estratosférico. En este sentido en la década de los setenta, Crutzen y Chameides propusieron que la oxidación del metano con el monóxido de carbono, en presencia de óxidos de nitrógeno daba lugar a una considerable producción de ozono (Morales, 2006).

A pesar que el ozono es un gas traza en la atmósfera es muy importante ya que es el iniciador de las cadenas de oxidación en la tropósfera, produciendo indirectamente OH y HO₂. La concentración natural del ozono en la atmósfera está referida entre los límites de 10 y 50 µgL⁻¹.

La producción de ozono a través de la oxidación de COV se puede dar mediante dos principales mecanismos: oxidación de hidrocarburos en general y oxidación de hidrocarburos con dobles enlaces; indicadas en las siguientes reacciones netas:



1.5 Fuentes de Generación de COT

Las emisiones de Compuestos Orgánicos Totales tienen dos orígenes: natural y antropogénico. Para el caso de emisiones naturales, las principales emisiones COT se encuentran en: la vegetación, los océanos y aguas superficiales, los suelos, los sedimentos, la descomposición microbiana de material orgánico en suelos y océanos, los depósitos geológicos de hidrocarburos, y los volcanes (Fehsenfeld, 1992).

Para el caso de emisiones antrópicas, originadas por las distintas actividades humanas, la oficina de investigación y desarrollo de la EPA ha realizado un listado con doce sectores que se cuentan entre las principales fuentes antropogénicas emisoras de COV dentro de las cuales se encuentran; fertilizantes y ganadería, generación eléctrica, quema de combustibles fósiles, combustión de madera residencial, eliminación de residuos, incendios, procesos industriales, vehículos de carretera, equipos de no carretera (gasolina, diesel, aviones, trenes y buques), caminos de tierra, uso de disolventes y misceláneo (agricultura, labores de cultivo y polvo de ganado, construcción, estaciones de servicio, terminales de gasolina a granel) (Air Emission Sources, 2010).

Dentro de las emisiones antropogénicas se puede diferenciar dos tipos de fuentes:

- **Fuentes Estacionarias:** Corresponden a las emisiones provocadas por fuentes que se encuentran en un lugar fijo y se subdividen en fuentes fijas puntuales y fuente estacionaria de área.

- Fuentes Móviles: Corresponden a aquellas actividades cuyas emisiones son de carácter móvil y se subdividen en fuentes móviles en ruta y fuentes móviles fuera de ruta.

Para conocer la contribución de cada fuente natural como antropogénica es necesario realizar inventarios de emisiones que permitan evaluar adecuadamente el papel que desempeñan las emisiones biogénicas y las antropogénicas en la producción y/o formación de contaminantes fotoquímicos; para poder establecer estrategias de control efectivas de estos contaminantes. Según el inventario de emisiones atmosféricas proyectado para el año 2010 en la Región Metropolitana, se estimó que las fuentes estacionarias emitirían 89.197,7 ton/año de COV, y las fuentes móviles emitirían 18.024,8 ton/año de COV (DICTUC, 2007). Mientras tanto la actividad de producción de cemento libera a la atmósfera 70 ton/año de COV (UDT, 2008).

Respecto de las emisiones antrópicas que nos ocupan en este estudio, se puede decir que la producción de cemento no es una fuente importante de COV. Pequeñas cantidades de componentes orgánicos pueden ser liberadas de las materias primas naturales y de los combustibles durante el proceso de producción de clinker. Bajo circunstancias normales, el contenido de COV's de los gases de escape de los hornos de cemento es bajo, por lo general entre 10 y 100 mg/N m³ (WBCSD, 2005). Sin embargo, parte de estas emisiones, especialmente las provenientes de los combustibles, puede ser evitada con un buen manejo de la combustión, lo que ha llevado a la legislación en diversos países a restringir estas emisiones.

Las empresas que producen cemento a partir de la elaboración de clinker en Chile son Cemento Bio-Bio, Cemento Melón y Cemento Polpaico; para el caso de las dos últimas cementeras mencionadas, el aporte de COT durante el año 2009 fue de 17,26 ton/año de COT por la chimenea del Horno 1 (AIRÓN, 2009) y 23,99 ton/año de COT por la chimenea del Horno 9 (SERPRAM, 2010), respectivamente (Ver Cálculos en Anexos). En el caso de Cemento Bio Bio, no existen mediciones por lo que no se conoce su emisión de COT.

Tabla 4. Resumen de Resultados de Mediciones Continuas de Concentración y Tasa de Emisión de Gases a condiciones de 25 ° C y 1 atm., para Cemento Polpaico (17/04/2009) y Cemento Melón (7/11/2009). (Fuente: Informe Test de Quema 2009 Horno 9 Cemento Melón e Informe Campaña de Mediciones 2009 Horno 1 Cemento Polpaico)

Parámetro	Cemento Polpaico	Cemento Melón
Combustible Utilizado	80% Petcoke 20% AF	63% Petcoke 4% Neumáticos usados 27% Combustible Sustituto Líquido 6% Combustible Sólido Gueso
COV (ppm) expresado como propano	6,1	-
CH ₄ (ppm) expresado como metano	2,4	4,44
THC (ppm) expresado como metano	-	19,7
O ₂ (%)	12,6	7,8
CO ₂ (%)	13,6	22,3
CO (µgL ⁻¹)	135,4	396,9
SO ₂ (µgL ⁻¹)	4	397,1
NOx (µgL ⁻¹)	308,7	760,7
MP (mg/N m ³)	5,01	10,3
Dioxinas y furanos (ng/N m ³)	0,0004	0,0077
Caudal (m ³ /N h)	269.027	165.970
Humedad de los Gases (%)	13	22,2
Velocidad de los gases (m/s)	12,85	23,5
Temperatura de los Gases (°C)	121	164,1

1.6 Impactos producidos por COV

Los compuestos orgánicos volátiles incluyen una gran variedad de sustancias, cuyo destino en el medio ambiente varía de un compuesto a otro. En general, los COV son degradados por la luz del sol, por lo que finalmente se reducen a compuestos más simples. Además participan en la formación de smog, reaccionando con los óxidos de nitrógeno para producir ozono troposférico, y una fuente importante de monóxido de carbono. (Sanhueza y col., 2001)

Los efectos que pueden producir los COV en el medio ambiente, dependen de su composición, su concentración y del tiempo de exposición. Algunos efectos pueden ser muy serios sobre animales y plantas (Air Toxics and Indoor Air Quality in Australia, 2010).

Recientemente, algunas evidencias han revelado que la producción y emisión de COV (como isopropeno y monoterpenos, que constituyen la mayor fracción de COV emitidos) podrían conferir protección a las plantas frente a elevadas temperaturas (Air Pollution, 2010).

Los efectos de los COV son a menudo poco conocidos pero se atribuye a algunos compuestos la facultad de causar irritaciones en la piel, mucosas y sistema pulmonar, así como náuseas, dolor de cabeza, vómitos, cáncer, alteraciones de la fertilidad y problemas en el desarrollo del embrión durante el embarazo (Compuestos Orgánicos Volátiles COV, 2010).

1.7 Sistemas de Medición de COT

Los compuestos orgánicos totales se miden por medio de un cromatógrafo de gases con detector de ionización de llama. El detector de ionización de llama es uno de los detectores más usados y versátiles. Básicamente es un quemador de hidrógeno/oxígeno, donde se mezcla el efluente de la columna (gas portador y analito) con hidrógeno. Inmediatamente, este gas mezclado se enciende mediante una chispa eléctrica, produciéndose una llama de alta temperatura. La mayoría de compuestos orgánicos al someterse a altas temperaturas pirolizan y se producen iones y electrones, que son conductores eléctricos. Esto establece una diferencia de potencial de unos centenares de voltios entre la parte inferior del quemador y un electrodo colector situado por encima de la llama. La corriente generada es baja (del orden de los 10-12 A), por lo tanto debe ser amplificada mediante un amplificador de alta impedancia (Detector de Ionización de Llama, 2011).

La energía o potencial de ionización es la energía necesaria para arrancar el electrón diferenciador de un átomo en estado gaseoso y fundamental, convirtiéndose en un ión monopositivo en estado gaseoso y fundamental y un electrón sin energía cinética. En el caso de la llama de hidrógeno, el PI es $15,42593 \pm 0,00005$ eV, lo cual significa que la llama de hidrogeno podrá ionizar cualquier molécula con un PI menor o igual a 15,4 eV, ocurriendo lo siguiente:



Por ejemplo el PI del metano (CH₄) es $12,61 \pm 0,01$ eV y del tolueno (C₇H₈) es $8,8276 \pm 0,0006$ eV; por lo tanto la llama de hidrogeno es capaz de ionizar los

átomos de carbono de estas dos moléculas orgánicas (National Institute of Standards and Technology, 2003).

El proceso de ionización que se da en la llama es complejo, pero se puede aproximar el número de iones producidos al número de átomos de carbono transformados en la llama. Esto produce que sea un detector sensible a la masa (al número de átomos de carbono que salen de la columna) más que a la concentración, por lo tanto no le afectan significativamente los cambios en el flujo de salida.

Existen algunos grupos funcionales que no dan respuesta en este detector, como el carbonilo, alcohol, halógeno o amina, y tampoco responden gases no inflamables como el CO, CO₂, SO₂, agua y óxidos de nitrógeno. Este hecho, más que limitar el ámbito de aplicación de este detector, permite el análisis de muestras contaminadas con alguno de los compuestos mencionados.

Una de las desventajas de este detector es que destruye la muestra (la piroliza) y dentro de las ventajas se puede mencionar lo siguiente:

- Alta sensibilidad, del orden de 10-13 g/s.
- Amplio intervalo lineal de respuesta, 10⁷ unidades.
- Bajo ruido de fondo (elevada relación señal/ruido).
- Bajo mantenimiento, fácil de fabricar.

Para conocer la concentración de COT en un caudal de gases de una fuente estacionaria existen dos tipos de monitoreos:

El Método CH 25-A “Determinación de la concentración de los compuestos orgánicos volátiles totales mediante un analizador de ionización de flama” (ISP, 2009). Este método establece la metodología para muestrear, acondicionar, analizar y proveer un registro de la concentración de compuestos orgánicos volátiles totales de vapores; constituidos principalmente por alcanos, alquenos y/o hidrocarburos aromáticos. La metodología básicamente consiste en extraer una muestra de gas desde la fuente y conducirla por una línea de muestreo hasta una unidad de analizador; la línea de muestreo debe ser calefaccionada a 121 ° C con el fin de evitar condensación, luego debe pasar por un filtro de fibra de vidrio con el fin de eliminar cualquier impureza existente en el gas. Finalmente la muestra de gas se combustiona en una llama que utiliza como combustible hidrógeno UHP y gas cero purificado, posteriormente un detector FID cuantifica la concentración de compuestos orgánicos volátiles totales de vapores.

Durante el periodo de medición se realizan calibraciones al inicio, cada una hora y al final del período de medición, asimismo el analizador es calibrado por el sistema con gas cero, gas de rango bajo, medio y alto.

El diagrama de muestreo se indica en la Figura 2 y están constituidos principalmente por:

- **Analizador de compuestos orgánicos:** Analizador de ionización de flama, con la capacidad para cumplir o exceder las especificaciones del método utilizado.
- **Sonda de muestreo:** De vidrio, acero inoxidable, o equivalente, del largo suficiente para recorrer los puntos de muestreo, orificios que deben tener 4 mm de diámetro aproximado y estar ubicados a 16,6 %, 50 %, y 83,3 % del

diámetro equivalente de la chimenea. Debe ser calentada para evitar condensaciones.

- **Línea de la sonda:** Tubería calentada (lo suficiente para evitar la condensación), de acero inoxidable o teflón, para transportar el gas de la muestra hacia el analizador.
- **Montaje de válvula de calibración:** Se recomienda un montaje de válvula de tres direcciones o equivalente, para bloquear el flujo de gas de la muestra e introducir gases de calibración al sistema de medición en la boca de salida de la sonda.
- **Filtro de particulado:** Es recomendado un filtro de fibra de vidrio dentro o calentado fuera de la chimenea (lo suficiente para evitar la condensación) si la carga de particulado en el gas de la chimenea es significativa. El filtro debe ser de lana de vidrio con 5 % de óxido de boro o de vidrio de cuarzo, o con una capa de fibra de vidrio. Todos los filtros que se usen deben estar fabricados con materiales que no reaccionen con el gas que se muestrea.
- **Registrador:** Para registrar los datos de las mediciones, se necesita un registrador de banda milimetrada, computador análogo o registrador digital. Para duraciones de muestreo menores a una hora, se pueden obtener mediciones a intervalos de un minuto o, un mínimo de mediciones de 30, lo que sea menos restrictivo. Para corridas de muestreos mayores a una hora, se pueden realizar mediciones cada dos minutos o, realizar un mínimo de 96 mediciones, lo que sea menos restrictivo.

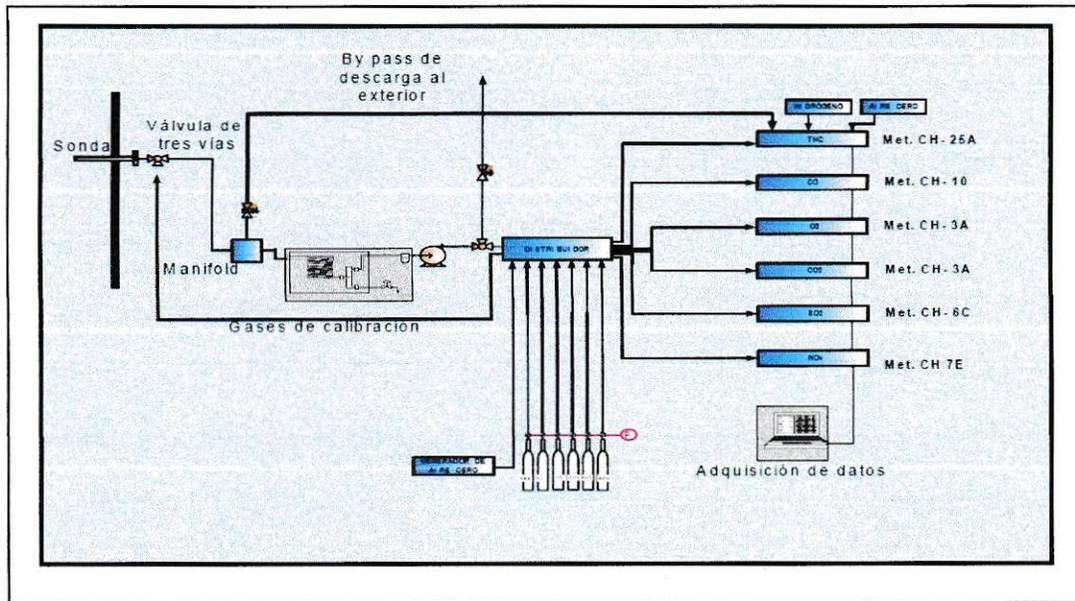


Figura 2. Diagrama de Muestreo de Gases. (Fuente: Informe Campaña de Mediciones 2010 Horno 1- Cemento Polpaico. Septiembre 2010)

El analizador de compuestos orgánicos entrega los resultados en términos de mg L^{-1} como carbono en función del gas de calibración utilizado. Para transformar esta concentración a mg C/N m^3 se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$C = \frac{S * NC_{GC} * MM_{c12}}{VM} \quad (2)$$

Donde :

C = Concentración [mg C/m^3]

S = Concentración [ppm/v]

NC_{GC} = Número de átomos de carbono en gas de calibración

MM_{c12} = Masa molar del carbono [Kg/Kmol]

VM = Volumen molar a condiciones normales de gas ideal : $22,4[\text{m}^3/\text{Kmol}]$

Los sistemas de monitoreo de COT pueden ser discreto o continuos. Los Sistemas de Monitoreo Discretos son sistemas simples que permiten muestrear,

acondicionar, analizar y proveer un registro discontinuo en el tiempo de partículas, gases y parámetros de proceso.

En el caso de los Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones en Chimenea (SMCE), son sistemas integrados que realizan mediciones de contaminantes directamente en la chimenea y están constituidos por todos los equipos necesarios para determinar la concentración de un gas o la emisión de material particulado que sea necesario controlar (GAMMA Ingenieros, 2007). Estos sistemas pueden ser utilizados para monitorear las emisiones de los siguientes procesos: Incineración de residuos sólidos urbanos, Incineradoras de lodos y residuos biológicos, Incineradora de residuos peligrosos, Procesos de gasificación y pirólisis, Hornos de cemento, Procesos de recuperación y destrucción de disolventes, Sistemas de desnitrificación y desulfuración de centrales térmicas, Hornos crematorios, Altos hornos de acero y aluminio, Procesos de fabricación de ladrillos, tejas y vidrio, Monitorización para protección de catalizadores, Investigación de procesos de combustión, entre otros.

En la actualidad, existen varios sistemas de análisis y paquetes de software de SMCE, que utilizan distintos criterios para el mismo fin: conocer la composición y concentración de los gases que salen por la chimenea de manera confiable y precisa (Mesias, 2009). Entre los principales modelos de SMCE se encuentran:

- **Sistemas Extractivos:** Donde la muestra se extrae en la chimenea y se bombea mediante un sistema de conducción a la unidad de análisis que posee gases patrones que permiten la calibración del equipo. Existen tres tipos de tecnologías para sistemas extractivos: **a)** Extracción fría con condensación, **b)** Extracción en caliente y **c)** Sistemas de dilución.

- Análisis *in situ* a través de chimenea: Donde la muestra se analiza midiendo sus propiedades físicas (principalmente ópticas) en la propia chimenea. Fue desarrollada para evitar los inconvenientes de los sistemas extractivos, tales como el transporte de la muestra y la posibilidad de alteración de ésta. El análisis *in situ* opera con un transmisor en un lado de la chimenea y un receptor al otro lado de ésta.
- Sistema integrado "*enveloped foldem beam*": Este sistema engloba lo mejor de los dos sistemas anteriormente señalados, es decir, un instrumento que puede ajustarse automáticamente a cero y que no modifica la muestra, con un mínimo de mantenimiento. Está compuesto por un equipo que tiene el transmisor y el receptor en la misma célula de medición, la que está montada directamente al interior de la chimenea en la cual se realizará el análisis.

En la Figura 3 se puede apreciar la unidad de análisis de un SMCE cuyo fabricante es ABB.

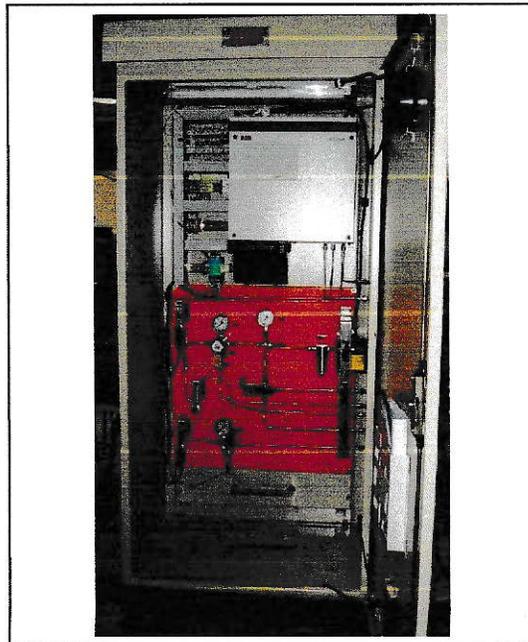


Figura 3. Diseño de la Unidad de Análisis de un SMCE de Marca ABB. (Fuente: Análisis en la Producción de Gases. M. Calvín. AWA08)

1.8 Medidas de Abatimiento para COT

En algunas fuentes fijas de procesos industriales no es posible cumplir con la normativa máxima de emisión de COT, por lo cual es necesario implementar medidas de abatimiento de COT; para poder establecer estas medidas lo primordial es caracterizar el tipo de gas residual que se tiene, para luego calcular la eficiencia requerida en el proceso por el equipo de control de emisiones (Sandoval y col., 1993). Existen variadas técnicas de abatimientos de compuestos orgánicos, dentro de las que destacan:

1. **Combustión:** Consiste en pirolizar el caudal de gases de tal forma de obtener como productos dióxido de carbono y agua, en el caso de tener una combustión ideal. Existen variados equipos de combustión, una primera clasificación permite separarlos en:
 - **Antorchas:** Combustión de tipo abierta, en dónde el oxígeno es suministrado por el aire en torno a la llama. Son operadas a nivel del suelo o elevadas. Cuando son operadas apropiadamente, logran una eficiencia mínima del 98 %.
 - **Incineradores térmicos:** Cuando se obtienen condiciones adecuadas de temperatura (750 a 1000 ° C), mezclando suficiente oxígeno y óptimo tiempo de residencia, también puede alcanzar una eficiencia mínima del 98 %.
 - **Incineradores catalíticos:** Similar a los anteriores, excepto de que emplean un catalizador para aumentar la velocidad de reacción y permitiendo que la reacción se realice a menores temperaturas (350 a 500 ° C). Lo cual significa un posible ahorro de combustible.

- **Calderos y calefactores:** Además pueden utilizarse como equipos de control para limitar la emisión de elementos orgánicos, incorporando la corriente gaseosa a la alimentación de combustible o conduciendo la corriente al caldero o calefactor, a través de un quemador separado.
2. **Reducción Catalítica:** Utilizada cuando la combustión no resulta eficiente debido al estado de máxima oxidación que presentan los contaminantes. Constituidos por un reactor, en cuyo interior se encuentra el catalizador. Cuando la corriente gaseosa pasa a través de él, tiene lugar la reacción catalítica que destruye los contaminantes.
 3. **Absorción:** Ampliamente utilizada para la recuperación de productos de separación y purificación de corrientes gaseosas con altas concentraciones de elementos orgánicos. En ésta técnica, los orgánicos de la corriente gaseosa son disueltos en un líquido. El contacto entre el líquido absorbente y la corriente gaseosa es realizado en torres de lavado, lavaderos, torres de rehelénlo, o columnas de platos. La absorción es utilizada con más frecuencia para gases inorgánicos (ácido sulfhídrico, cloruros) que para gases orgánicos.
 4. **Adsorción:** Una de las técnicas más solicitadas para el control de vapores orgánicos, utilizando carbón activado como adsorbente para gases con baja concentraciones orgánicas. Estos sistemas consisten normalmente en uno o más recipientes de carbón activado que adsorben orgánicos en un período de tiempo determinado, hasta que el carbón se satura, cuando esto ocurre, es reemplazado por uno nuevo.

5. Condensación: Usados para separar uno o más componentes volátiles desde la mezcla de vapores por medio de la saturación, seguido de un cambio de fase gas-líquido. Puede ser logrado de dos maneras: La presión del sistema es incrementada a una temperatura dada y la temperatura del sistema es reducida a presión constante. Normalmente, los condensadores operan a la presión de la fuente de emisión, es decir, a la presión atmosférica.

1.9 Descripción del Área de Estudio, Proceso de Productivo y Normativa Ambiental de Cemento Polpaico S.A.

1.9.1 Ubicación y Características Ambientales

El estudio se ha desarrollado en una de las plantas de Cemento Polpaico S.A. ubicada en el kilómetro 38 de la carretera Panamericana Norte (Ruta 5 Norte), en la localidad de Cerro Blanco, comuna de Til-Til, Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana.

Según lo indicado por el PRMS, la planta se encuentra emplazada dentro de la Zona Industrial Exclusiva con desarrollo condicionado y sus coordenadas UTM son: 6.329.800 N y 329.650 E, tal como se indica en la Figura 4.

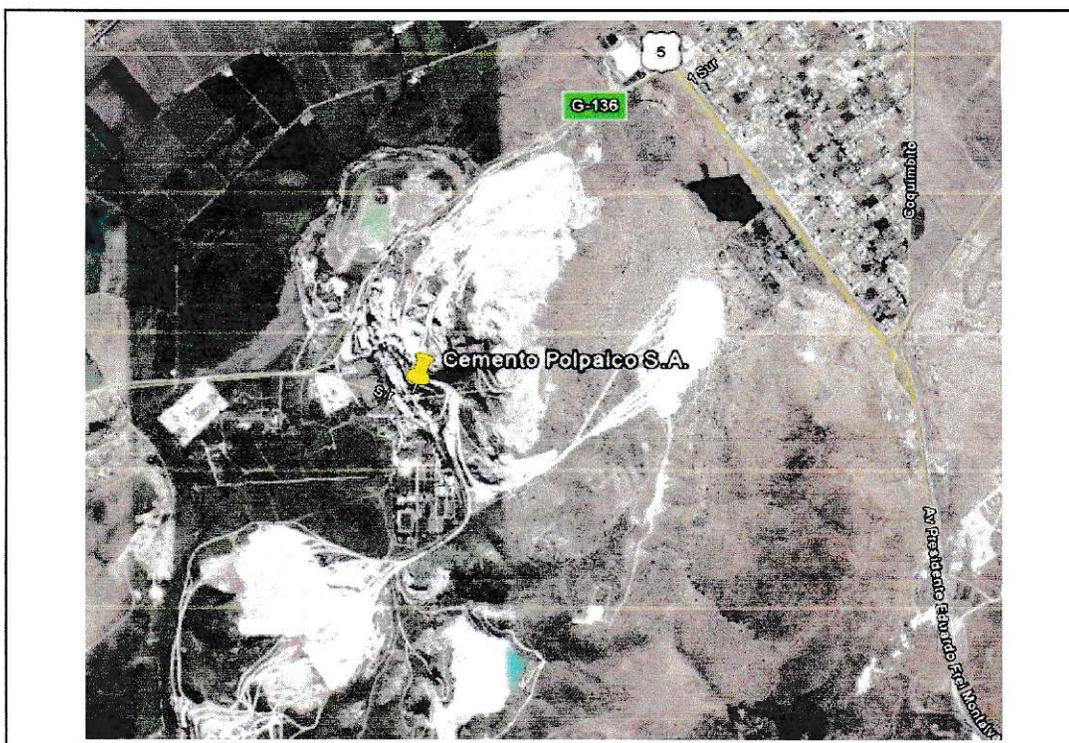


Figura 4. Fotografía Satelital del Lugar de Emplazamiento de la Planta de Cemento Polpaico S.A. (Fuente: Google Earth)

La provincia de Chacabuco está ubicada al Norte de la Región Metropolitana, tiene una superficie de 5.615,2 Km² y está constituida por tres comunas: Colina, Lampa y Tiltil (Provincia de Chacabuco, 2011). Tiltil limita al Norte con Rinconada y Llaillay, al Sur con Lampa, al Este con Colina, al Oeste con Olmué y Limache. Según la ficha comunal, tiene una superficie de 653 Km² y la población estimada para el año 2010 era de 15.998 habitantes, de los cuales el 55,48 % residen en el sector urbano y el 44,52 % residen en el sector rural (Ficha Comunal, 2011). Dentro de las localidades existentes en esta comuna podemos nombrar: Til-Til, Huertos Familiares, Polpaico, Cerro Blanco, Rungue, Montenegro, Santa Matilde y Caleu; la gran mayoría de estos poblados se caracterizan por la producción de olivos y tunas.

Considerando datos obtenidos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2009), de un total de 660 establecimientos ubicados en la comuna de Til-Til las tres

principales actividades son: Código CIUU 5211 *“Venta al por menor en almacenes no especializados con surtido compuesto principalmente de alimentos, bebidas y tabaco”* (105 establecimientos), Código CIUU 6023 *“Transporte de carga por carretera”* (61 establecimientos) y Código CIUU 5220 *“Venta al por menor de alimentos, bebidas y tabacos en almacenes especializados”* (105 establecimientos) (Ver Tabla 44 en Anexos).

Desde el punto de vista ambiental podemos mencionar de la Provincia de Chacabuco:

- A. La taxonomía de los suelos de la Provincia de Chacabuco se caracterizan por poseer suelos de tipo Vertisoles, Mollisoles y Misceláneos. El uso de estos suelos es principalmente urbano (área urbana consolidada) y agropecuario (terrenos agrícolas). Además existentes localidades en donde los suelos reciben una gran carga de contaminantes, por ejemplo: en Rungue, al norte de Lampa y cerca de Huertos Familiares (CONAMA, 2002).

- B. Los cauces presente en la Provincia de Chacabuco son: Estero Lampa, Estero Rungue, Estero Polpaico y Estero Colina. El uso del agua en la provincia de Chacabuco es principalmente de tipo extractivo para el riego, en donde los Esteros Lampa y Rungue riegan una superficie de 3.252 hectáreas ubicadas en las comunas de Lampa, Polpaico y Colina.

En la Tabla 5 y Tabla 6 se muestra los factores naturales y antropogénicos que afectan la calidad de los Esteros Colina y Lampa.

Tabla 5. Factores Incidentes en la Calidad del Agua en el Estero Colina. (Fuente: Diagnóstico y Clasificación de los cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. DGA, 2004)

Estación de calidad/segmento	Factores incidentes		Parámetros que pueden verse afectados	Caracterización del factor
	Naturales	Antropogénicos		
Esteros Colina en Compuerta Vargas 0573-EC-10	Origen subterráneo de las aguas superficiales de estero Colina	Descarga de Riles Cultivos agrícolas	Cu, Cr, Zn, Al, Pb, Mo Posiblemente CF, CT, DBO ₅	<ul style="list-style-type: none"> - Conservación de recursos naturales, Santuario de la Naturaleza "Humedal de Batuco" - Hidrogeología, surgencia de aguas - Centros poblados, ciudad de Colina - Minería, yacimientos de caolin (aluminosilicato) y relave minero - Agricultura intensiva y tecnificada - Hidrogeología, río pierde continuidad en periodo estival. Extracción para riego
	Lixiviación superficial y subterránea de filones de mineralizado de formaciones geológicas	Contaminación difusa por aguas servidas		

Tabla 6. Factores Incidentes en la Calidad del Agua en el Estero Lampa. (Fuente: Diagnóstico y Clasificación de los cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. DGA, 2004)

Estación de calidad/segmento	Factores incidentes		Parámetros que pueden verse afectados	Caracterización del factor
	Naturales	Antropogénicos		
Esteros Lampa a/ río Mapocho 0573-LA-20	Recarga de esteros por afloramiento de napas subterráneas	Reuso de aguas de riego	CE, OD, Cl, SO ₄ , Fe	<ul style="list-style-type: none"> - Hidrogeología, surgencia de aguas - Aguas servidas, Empresa Sanitaria Servicomunal S.A. (abastece Colina y Lampa) - Agricultura intensa y tecnificada. Existencia de 44000 Ha apróx. de cultivos - Relleno Sanitario Lomas Los Colorados (KDM) - Santuario de la Naturaleza "Humedal de Batuco" - Centros poblados: Lampa, Polpaico, Rungue, Montenegro y Til-til - Industrias: Cerámicas Cordillera, Cemento Polpaico - Minería: relaves mineros, cemento Polpaico y pequeña minería - Hidrogeología, extracción para riego - Vertederos, existencia de vertederos clandestinos de residuos peligrosos y escombros de construcción
		Existencia de descargas industriales	Cu, Cr, Mn, Zn, Al, Pb, Mo, SST	
		Contaminación difusa por aguas servidas	Posiblemente SD, NH ₄ , CN, NO ₂ , Sn, CT, CF, DBO ₅ Carbofurano Clorotalonil	
		Aplicación de plaguicidas		
		Existencia de empresa minera		
		Agricultura y aplicación de pesticidas		
Existencia de pequeña minería de cobre				

En la Tabla 7 se observa el cumplimiento de tres meses (Abril 2011 a Junio 2011) las industrias que descargan sus riles en los cursos de agua de la Provincia de Chacabuco.

Tabla 7. Catastro Cumplimiento Normativa D.S.90/00 y D.S.46/02 - al 30 de Junio de 2011 en la Provincia de Chacabuco. (Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SISS)

Norma	Planta	Comuna	Punto de Descarga	abr-11	may-11	jun-11
DS 46/02: Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas	CHEVRITA S.A.	Colina	Infiltración	Cumple	Cumple	Cumple
	BATERIAS COSMOS (LAMPA)	Lampa	Infiltración	No Descarga	No Descarga	No Descarga
	CAMILO AGUILERA RECABAL	Til Til	Infiltración	Cumple	No Cumple	No Cumple
	EL PALESTINO (TIL TIL)	Til Til	Infiltración	No Informa	No Informa	No Informa
	OSCAR MIGUEL DONAIRE DONOSO Y OTROS (EX APROACEN)	Til Til	Infiltración	No Informa	No Informa	No Informa
	PLANTA PROCESADORA DE ACEITUNAS LA TILTILANA	Til Til	Infiltración	Cumple	Cumple	Cumple
	PRODUCTOS CHILENOS DEL ACERO (TIL TIL)	Til Til	Infiltración	No Descarga	No Descarga	No Descarga
	SERVICIOS SANITARIOS NORTE LTDA. (TILTIL)	Til Til	Infiltración	Cumple	Cumple	Cumple
	WENDY MORALES (TIL TIL)	Til Til	Infiltración	No Informa	No Informa	No Informa
DS 90/00: Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales	EXSER AGROINDUSTRIAL (COLINA)	Colina	Canal Colina	No Descarga	No Descarga	No Informa
	GERDAU AZA S.A.	Colina	Estero Los Patos	No Cumple	Cumple	Cumple
	SANITARIOS COLINA LTDA.	Colina	Canal El Carmen	Cumple	Cumple	Cumple
	CERAMICA SANTIAGO (BATUCO, LAMPA)	Lampa	Desague Humedal Batuco	No Descarga	No Descarga	No Descarga
	PAPELES INDUSTRIALES S.A.	Lampa	Canal de Derrame, Lampa	Cumple	Cumple	Cumple
	REXAM CHILE S.A.	Lampa	Canal de Derrame, Lampa	No Cumple	Cumple	Cumple
AGRÍCOLA FRUTERA CURACAVI S.A. (POLPAICO)	Til Til	Quebrada Natural, Polpaico	No Descarga	Cumple	Cumple	

C. Las condiciones naturales de la ciudad de Santiago son de poca ventilación y los flujos locales de circulación atmosférica (desarrollo de brisas valles y montañas que provocan que el flujo predominante en la Provincia de Chacabuco sea del Norte en las tardes de invierno y del Sur en las tardes de verano) provocan que se acumulen y recirculen contaminantes (Sandoval et al., 1993). Es por esto que la ciudad de Santiago la calidad del aire está

declarada Zona Saturada para Material Particulado, Monóxido de Carbono y Ozono, y Zona Latente para Dióxido de Nitrógeno.

La estación de monitoreo de la Red Oficial de Monitoreo Automático de Calidad del Aire y Meteorología (Red MACAM 2 RM) más próxima a la Provincia de Chacabuco es la estación V, ubicado en la Comuna de Quilicura (Estadio Municipal de Quilicura, Av. José Francisco Vergara esq. San Luis) y se muestra en la Figura 5.

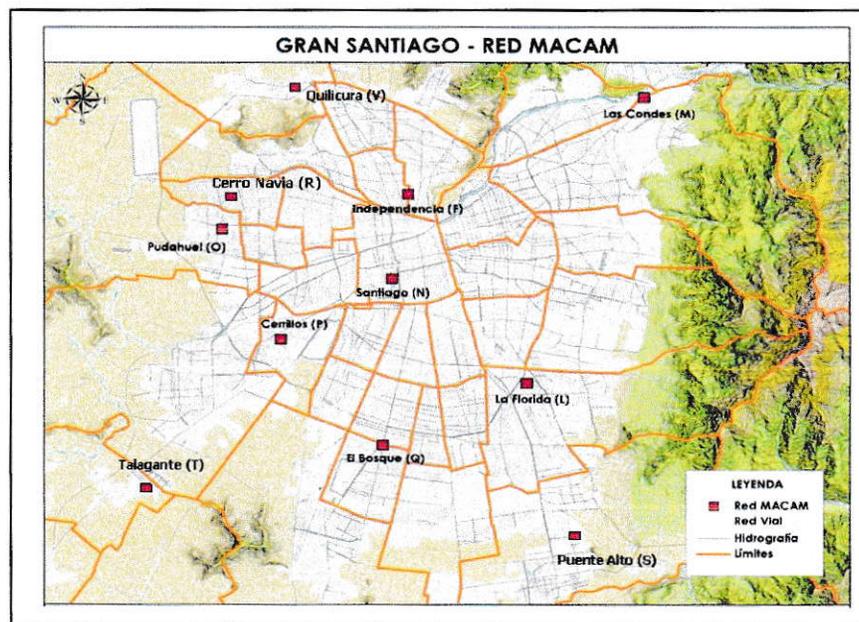


Figura 5. Lugares de Monitoreo de Calidad de Aire, Red Macam-2. (Fuente: Departamento de Salud Pública de la Seremi de Salud RM)

Con respecto a la calidad del aire de la zona, el promedio de los datos horarios registrados mediante un equipo de medición TEOM, durante el año 2010 de material particulado en suspensión menor a 10 micrones (MP-10) fue de $77 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (ASRM, 2010), mientras que el material particulado en suspensión menor a 2,5 micrones (MP-2,5) fue de $27 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$.

D. La vegetación de la Provincia de Chacabuco se caracteriza por ser un matorral abierto, bajo o enano de carácter espinoso y semixerófito (Miranda et al, 2005). Dentro de la flora del lugar se distinguen: Espinos (*Acacia cavens*), Algarrobos (*Prosopis chilensis*), Robles de Santiago (*Nothofagus macrocarpa*), Tototal (*Thypha angustifolia*, *Schoenoplectus californicus* o *Scirpus californicus*) y herbáceas bajas perennes nativas como la Frankenia salina. Dentro de la fauna habitan muchas aves en el espejo de agua del humedal de Batuco, las cuales viven en esta zona, otras vienen desde la Cordillera de Los Andes (migración altitudinal) y otras llegan en verano (migraciones desde el hemisferio norte), podemos distinguir: Perritos, Gargas cucas, Pato jergón, Gaviotas, Siete colores, Trile, Cisnes, Taguas y Trabajadores (Iturriaga, 2011). En el área también existen especies de reptiles, como el culebra de cola corta (*Tachymenis chilensis*) y el culebra de cola larga (*Philodryas chamissonis*), algunos anfibios como el sapito de cuatro ojos (*Pleurodema thaul*) y mamíferos como el zorro culpeo (*Pseudalopex culpaeus*) y el zorro chilla (*Pseudalopex griseus*) (Ugarte, 2011).

E. Dentro de los sitios prioritarios de conservación de la biodiversidad de la SNASPE (Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado) que involucran total o parcialmente a la Provincia de Chacabuco y poseen planes de acción en torno a la Estrategia para la Conservación de la Biodiversidad de la Región Metropolitana indicados en la Figura 6, se destacan (CONAMA, 2009):

- **El Roble:** su extensión es de 88.520 hectáreas, se encuentra ubicado en el sector norponiente de la Cordillera de la Costa y administrativamente comprende las comunas de Tilttil, Lampa, Pudahuel y Maipú y parte Norte de la

comuna de Curacaví. Se destacan el Santuario de la Naturaleza “Cerro El Roble”, el Área de Preservación Ecológica de la Provincia de Chacabuco (cota 700 m.s.n.m.), y el Área de Protección de Ecosistemas Vegetacionales y el Área de Protección Prioritaria de la comuna de Curacaví.

- **Humedal de Batuco:** su extensión es de 14.788 hectáreas, se encuentra ubicado en el sector norponiente de la región, y administrativamente comprende la parte centro-oriente de la comuna de Lampa; extremo sur de la comuna de Til Til y el extremo norte de comuna de Quilicura. Se ha definido el sitio como zona prohibida de caza. Es el único humedal presente en la región y es de gran importancia por (Iturriaga, 2011): Control de inundaciones, Reposición de napas subterráneas, Estabilización de costas y protección contra marejadas, Retención de sedimentos y nutrientes, Depuración de aguas y Mitigación del cambio climático.

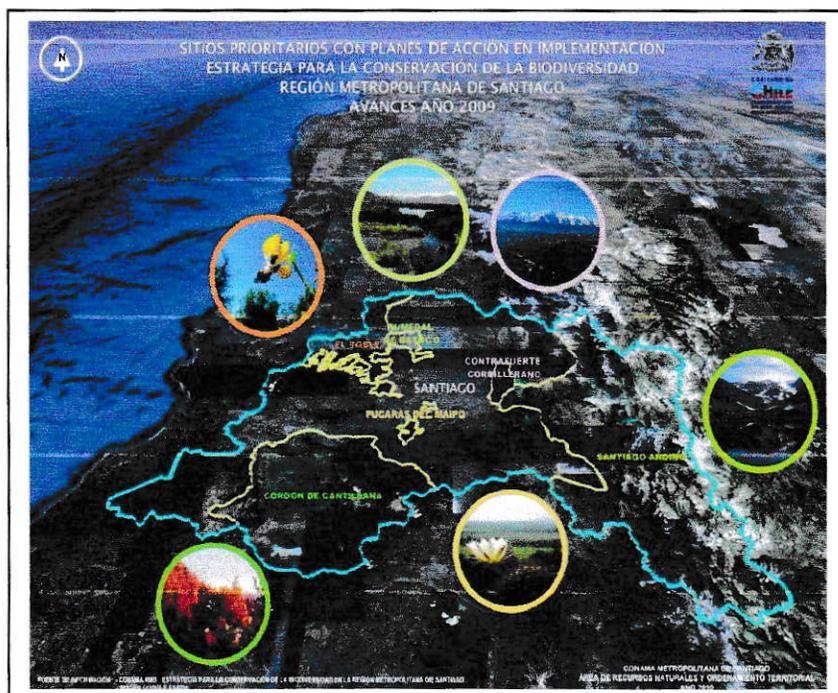


Figura 6. Humedal de Batuco y El Roble, sitios prioritarios de conservación de la biodiversidad den la Provincia de Chacabuco RM. (CONAMA, 2009)

1.9.2 Descripción del Proceso Productivo de Cemento Polpaico S.A.

CEMENTO POLPAICO S.A. es uno de los principales actores de la industria del cemento en Chile, con una participación de mercado nacional del orden de 32 % y una capacidad de producción anual cercana a 2,7 millones de toneladas de cemento. Su principal accionista y controlador es el grupo cementero suizo Holcim, uno de los más importantes productores de cemento, hormigón y servicios relacionados con la construcción a nivel mundial, y con presencia en más de 70 países en cinco continentes. Participa en los diversos segmentos de mercado en la industria del cemento. En Chile, a través de su filial Pétreos S.A., produce hormigones premezclados y áridos para todo tipo de obras (Productos y Servicios: Cemento, 2011).

Actualmente la empresa cuenta con tres plantas para la producción de cemento (Cemento Polpaico S.A., 2004):

- Planta Polpaico: ubicada en la Región Metropolitana, es la única y principal planta productora de clinker y cemento, se puso en marcha en el año 1949, posee una capacidad de producción de 1,6 millones ton/año.
- Planta Mejillones: ubicada en la Región de Antofagasta, es una planta productora de cemento (no produce clinker), se puso en marcha en el año 2001, posee una capacidad de producción de 0,3 millones ton/año.
- Planta Coronel: ubicada en la Región del Bío-Bío, es una planta productora de cemento (no produce clinker), se puso en marcha en el año 1999, posee una capacidad de producción de 0,8 millones ton/año.

El Proceso de Fabricación de Clinker y Elaboración de Cemento la Planta Polpaico, que es la planta objeto de este estudio, de la empresa de Cemento Polpaico S. A. se realiza en las siguientes etapas (Ilabaca, 2010):

A. Extracción de Materias Primas

La etapa inicial para la fabricación de clinker, se centra principalmente en la extracción de la materia prima "caliza" (carbonato de calcio, CaCO_3) desde yacimientos propios.

Los yacimientos de caliza se habrían originado y depositado en un ambiente marino y costero muy próximo a la línea de costa con cierta pendiente y en torno a la base de las olas de tormentas; y tendrían una edad Albiano Medio (Carvallo, 2010). En la zona se encuentran cuatro áreas con yacimientos propios de piedra caliza: Cerro Blanco, Cerro Mesa, Calerías Viejas y Loma Oriental.

De la tronadura de las canteras en los distintos yacimientos resulta una pila de roca quebrada de dimensiones adecuadas para poder ser removida y transportada a la planta. Otras Materias primas utilizadas son; puzolana, bauxita, caolín, yeso, óxidos de hierro y reactivos de flotación.

Para poder elaborar el producto deseado, es necesario contar con materias primas que contengan cal, sílice, alúmina y óxidos de hierro. Aunque estos elementos raramente se encuentran en las proporciones deseadas en una sola sustancia, se hace necesario realizar una mezcla de sustancias ricas en caliza (alto componente calcáreo), con otras sustancias ricas en alúmina y óxidos de hierro (componentes arcillosos).

Los yacimientos propios de Polpaico, poseen una baja ley o bajo contenido de carbonato de calcio de las calizas (alrededor de un 58 %), por ende se hace necesario contar con un sistema que permita concentrar el carbonato de calcio y llegar a una concentración óptima entre 80 y 82 %.

B. Preparación de Crudo

Luego que se ha producido la tronadura en la cantera, la roca caliza es transportada mediante camiones para su posterior trituración; tal como se muestra en la Figura 7.

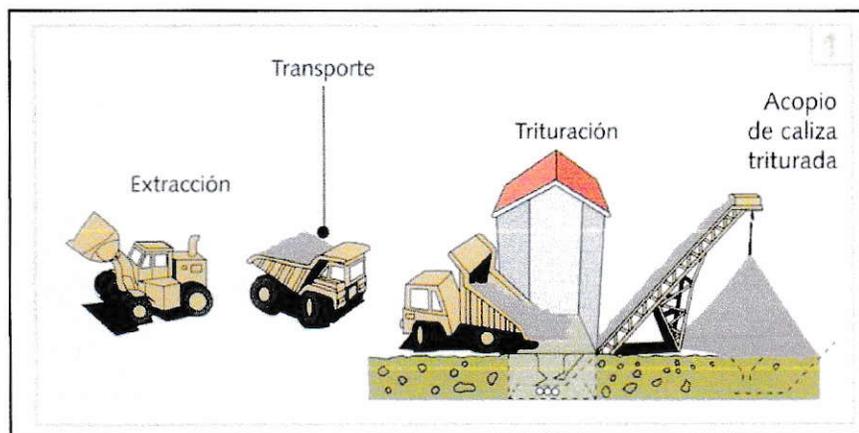


Figura 7. Proceso de Fabricación de Clinker y Elaboración de Cemento: Transporte y Trituración de Materia Prima. (López, 2001)

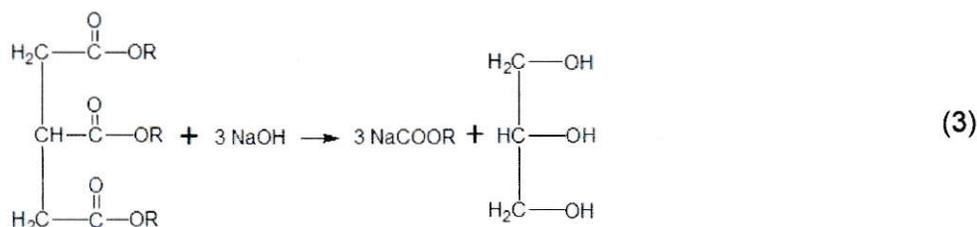
Las materias primas son llevadas mediante cintas transportadoras hasta chancadores y molinos, con el fin de conseguir un polvo de materia prima muy fino.

Para lograr este polvo fino o crudo, ocurren las siguientes etapas:

- Chancado: En esta etapa se obtienen dos tipos de materiales: el material caliza y el material poroso, este último presenta características de arenilla de menor tamaño y con altos contenidos de cuarzo.

- Molienda Húmeda: El objetivo de ésta etapa es pulverizar el material hasta lograr una fineza de alrededor de 60 – 65 %. Esta pulverización es importante para que los compuestos presentes en la materia prima puedan reaccionar en la etapa de fabricación de clinker.

- Concentración: Etapa realizada para dar mayor calidad al material molido en la etapa anterior. La caliza ingresa con una concentración de CaCO_3 aproximada de 62 a 67 %. En esta etapa se consigue una concentración de 80 a 82 %, una granulometría de 85 a 90 % bajo la malla 5/8" y un porcentaje de humedad de 75 a 80 %. En la Planta Polpaico, el proceso de concentración se realiza mediante vía húmeda, es decir, adicionando agua al material obtenido de la molienda, utilizando métodos de flotación. Una vez agregada el agua, se produce una pulpa, a la cual se le agregan reactivos que provocan una hidrofobicidad sobre las partículas de interés. Estos reactivos son tensoactivos, siendo uno de ellos el colector, que se adsorbe selectivamente sobre el material y lo transforma en hidrofobico. El colector utilizado en la planta se llama "Fat-oil", y es una mezcla resultante al mezclar ácido oleico, soda y agua; en ésta mezcla ocurre una reacción conocida como "saponificación":



Otro tensoactivo utilizado es el espumante, el cual es el encargado de estabilizar las burbujas de aire de las celdas de flotación. Se llama "Montanol" y es una mezcla de alcoholes. Este tensoactivo es adicionado celda por medio.

Las propiedades fisicoquímicas del ácido graso empleado en la elaboración del fat-oil y el espumante empleado en la estabilización de las burbujas de aire se indican en las Tabla 8 y Tabla 9, respectivamente.

Tabla 8. Propiedades Fisicoquímicas del Ácido Graso (Oleina 200), componente principal del Fat-oil.

Propiedad	Comentario
Estado Físico	Líquido (por encima de 25 °C)
Apariencia y color	Color café oscuro
Concentración	100 %
pH	No Aplicable
Temperatura de descomposición	No Aplicable
Punto de inflamación	> 350 °C
Temperatura de autoignición	No Disponible
Propiedades explosivas	No
Peligro de fuego o explosión	No Aplicable
Velocidad de propagación de la llama	No Aplicable
Presión de vapor a 20 °C	< 1 mbar (100 °C)
Densidad de vapor	0,90 aprox. A 70 °C gr/ml
Densidad a 20 °C	No Disponible
Solubilidad en agua y otros solventes	En agua: Insoluble

Tabla 9. Propiedades Fisicoquímicas del Agente Espumante (Montanol 800).

Propiedad	Comentario
Estado físico	Líquido
Color	Amarillo
Olor	Típico
pH	Aprox. 6 (3 g/L H ₂ O, 20 °C)
Punto de congelación	< - 60 °C
Punto de ebullición	205 – 320 °C
Punto de inflamación	90 – 100 °C
Temperatura de autoignición	Aprox. 265 °C
Propiedades explosivas	No aplicable
Densidad a 20 °C	Aprox. 0,9 g/mL
Solubilidad	3 g/L en agua

Se inyecta aire en forma de burbujas para que las partículas de interés se adhieran a ellas y asciendan a la superficie de la piscina de flotación. Una vez en la superficie de la piscina de flotación, estas burbujas son retiradas y enviadas a la siguiente etapa del proceso. Las partículas hidrofílicas permanecen en el centro de la pulpa y se depositan en el fondo de la celda de flotación para ser desechadas.

- **Espesamiento:** Etapa cuya fin es disminuir el porcentaje de humedad de la pasta originada en la etapa de concentración desde un 75 – 80 % hasta un 50 %. El carbonato de calcio concentrado en la etapa de flotación, es enviado por medio de canales a uno de los cinco espesadores existentes.
- **Silos de Mezcla:** En ésta etapa tal como se muestra en la Figura 8, el concentrado proveniente de los espesadores se le agrega alúmina (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3), ambos compuestos juegan un rol importante en una posterior producción de clinker. Este procedimiento se realiza en los Silos de Mezcla, dónde el concentrado, es mezclado con pastas correctoras de Al_2O_3 y Fe_2O_3 .

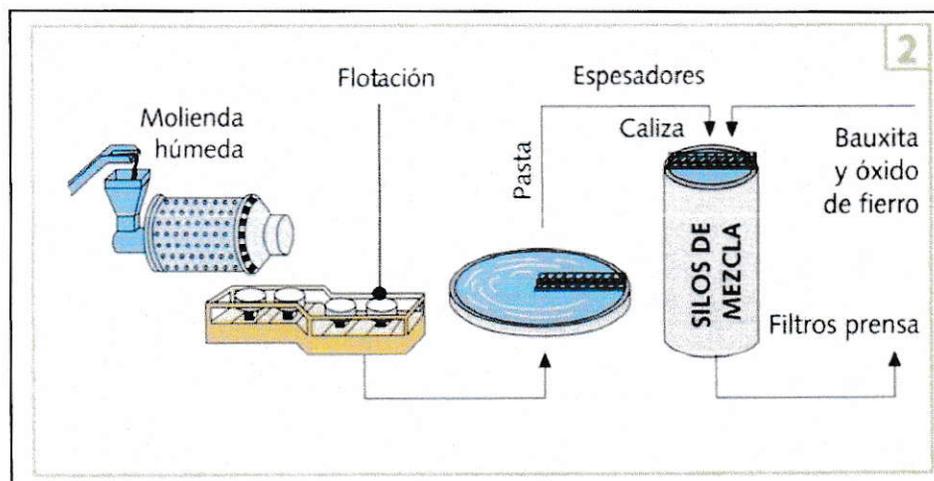


Figura 8. Proceso de Fabricación de Clinker y Elaboración de Cemento: Elaboración de Pastas. (López, 2001)

Una vez preparada la pasta, es analizada químicamente. Si los resultados de los análisis son concordantes con los valores guía entregados previamente por el laboratorio, el silo es aprobado y descargado hacia la balsa, la cual funciona como estanque pulmón, posteriormente es llevada hacia la etapa de filtración. Si los resultados de los análisis no concuerdan con los valores guías, se recalcula cuanta pasta correctora, y en que proporción falta y, se le agrega. Se vuelve a analizar, se aprueba, y se envía a la balsa. Si la cantidad de componente reactivo sobrepasa la

capacidad del silo, éste se envía nuevamente hacia los espesadores (silo descabezado) para poder remezclar y analizar nuevamente.

- Filtro Prensa: Etapa en la cual la pasta proveniente de los silos de mezcla, que contiene aproximadamente un 50 % de humedad, es filtrada para lograr una humedad en la pasta de 15 a 17 %.

- Secado: Etapa cuyo objetivo es disminuir la humedad del crudo proveniente de los filtros de prensa desde 15 a 17 % hasta menos de 1 % de agua. Para lograr la reducción de agua, se utiliza un secador rotatorio, accionado por un motor eléctrico. La reducción de agua ocurre mediante transferencia de calor entre el crudo y la mezcla de gases calientes provenientes desde el enfriador de clinker y la torre de precalentamiento, los cuales son transportados mediante ventiladores exhaustores. El crudo y los gases calientes entran en contracorriente al secador rotatorio, siendo la presión de entrada al secador de -3 mbar. Los gases entran con una temperatura de 390 ° C y la mezcla de polvo más gases sale a una temperatura aproximada de 120 ° C.

El secador rotatorio además es alimentado con una fracción de polvo del filtro de mangas, el cual es incorporado a la entrada del secador; esto tiene como objetivo disminuir la humedad del crudo alimentado y así evitar aglomeración y/o adherencia de producto en las paredes del equipo. Posteriormente el polvo y los gases húmedos son llevados hacia un filtro de mangas para su separación. En éste tipo de filtros, el gas cargado de polvo atraviesa las mangas desde afuera. El gas limpio de polvo, en cambio, fluye por el centro de la manga al receptor de gas limpio y de allí hacia la chimenea, extraído por el exhaustor principal. El polvo queda depositado en la superficie exterior de la manga.

C. Producción de Clinker

Es la etapa más relevante del proceso y se muestra en la Figura 9, ya que ocurren reacciones químicas a altas temperaturas (1.400 y 1.500 ° C) que le proporcionan las características y propiedades al clinker; y posteriormente al cemento.

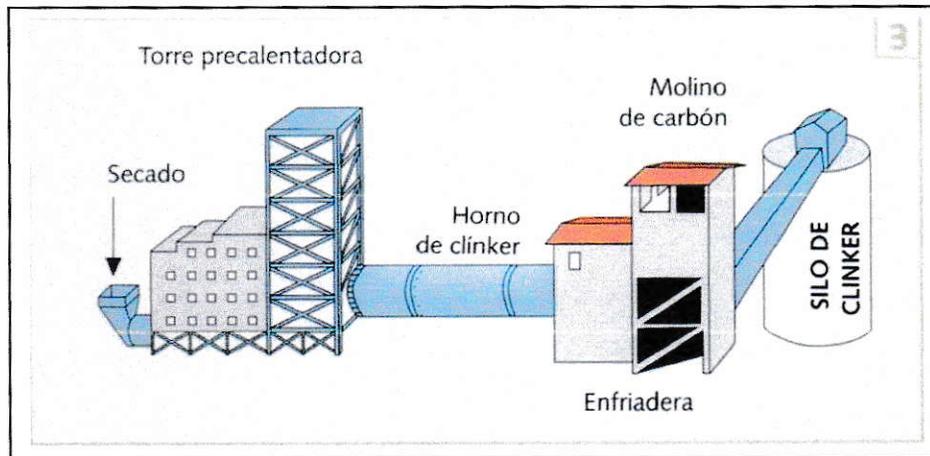


Figura 9. Proceso de Fabricación de Clinker y Elaboración de Cemento: Fabricación de Clinker. (López, 2001)

Ésta etapa consiste en precalentar desde 80 ° C hasta 800 ° C aproximadamente, la harina cruda (en promedio 155 ton/h) proveniente desde el filtro de mangas. La harina cruda se precalienta en una estructura denominada torre de precalentamiento. Este precalentamiento se logra mediante el intercambio de calor con los gases provenientes del horno. En esta etapa se retira la humedad restante (entre 0,5 y 0,8 %) y se produce la precalcinción.

Luego la harina precalcincada (mas conocida como "hotmeal") entra al horno donde se produce su sinterización y clinkerización a temperaturas entre 1338 ° C y 1450 ° C. Finalmente el clinker producido es rápidamente enfriado mediante intercambio de calor con aire proveniente de ventiladores en el enfriador de clinker y es llevado

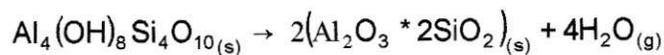
mediante cadenas transportadoras hacia una cancha de acopio ubicada a continuación de la descarga del horno. Posteriormente, mediante un sistema de transporte de bandas transportadoras el material es llevado al silo de clinker.

El proceso de fabricación de clinker, específicamente el ocurrido en el horno, es un proceso endotérmico y las principales reacciones de transformaciones químicas en el tratamiento térmico del crudo, para la obtención de clinker son:

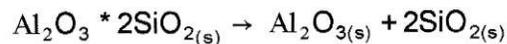
- Temperatura < 100°C. Secado, eliminación del agua libre:



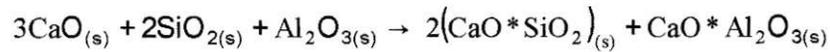
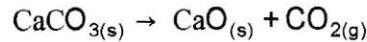
- Temperatura desde 100 a 400 ° C, eliminación del agua absorbida.
- Temperatura desde 400 a 750 ° C, descomposición de la arcilla con formación de metacaolinita:



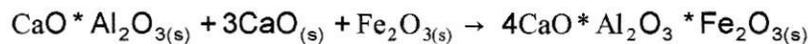
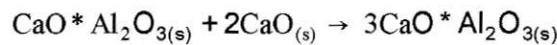
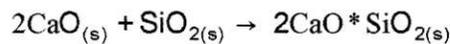
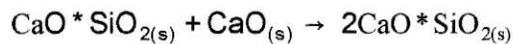
- Temperatura desde 600 a 900 ° C, descomposición de la metacaolinita y otros compuestos con formación de una mezcla de óxidos reactivos:



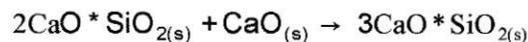
- Temperatura desde 600 a 1000 ° C, descomposición de la caliza con formación de CS y CA:



- Temperatura desde 800 hasta 1300 ° C, fijación de cal por CS y CA con formación de C₂S, C₃A y C₄AF:



- Temperatura desde 1250 hasta 1450 ° C, nueva fijación de cal por C₂S:



En la Figura 10 se muestra un diagrama de cantidad de compuestos químicos formados en función de la temperatura, durante la ocurrencia de reacciones químicas de formación del clinker.

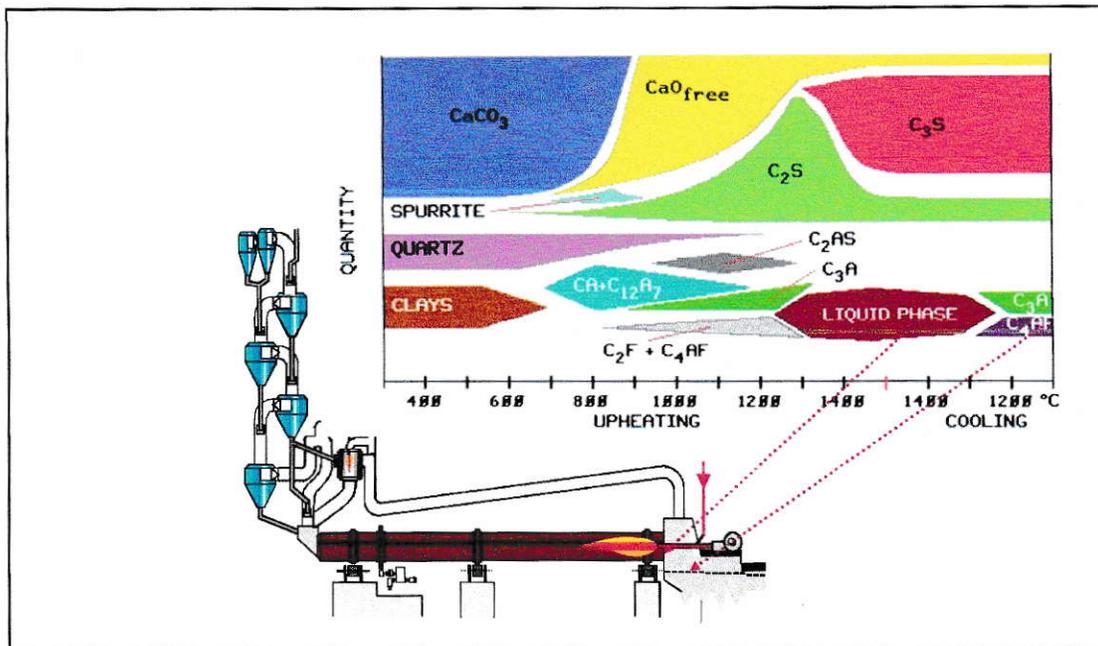


Figura 10. Cantidad de Compuestos Químicos en función de la Temperatura, durante las Reacciones Químicas de Formación del Clinker. (Fuentealba, 2002)

En la Tabla 10 se encuentran disponibles las abreviaciones de las cuatro fases del clinker: C_3S (alita), C_2S (belita), C_3A (aluminato) y C_4AF (ferrita).

Tabla 10. Abreviaciones de las principales fases del clinker. (Velásquez, 2001)

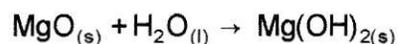
Abreviatura	Nombre Compuesto	Nomenclatura Compuesto
C	Óxido de Calcio	CaO
S	Dióxido de Sílice	SiO ₂
A	Óxido de Aluminio	Al ₂ O ₃
F	Oxido de Hierro	Fe ₂ O ₃
C_3S	Alita	3 CaO*SiO ₂
C_2S	Belita	2 CaO*SiO ₂
C_3A	Aluminato	3 CaO* Al ₂ O ₃
C_4AF	Ferrita	4 CaO* Al ₂ O ₃ * Fe ₂ O ₃

Las principales materias primas para la obtención de clinker, como ya se ha mencionado son: caliza (CaCO₃), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃). Los dos últimos actúan como fundentes y los dos primeros como componentes activos. Además en el crudo existen componentes adicionales

provenientes de las materias primas, que si no se controlan pueden provocar una mala calidad de producto (clinker).

Los principales componentes adicionales del crudo son:

- Óxido de Magnesio (MgO): Encontrado generalmente en la caliza como dolomita ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$), el cual está combinado hasta un 2 % en las fases principales del clinker. En un porcentaje más alto, se encuentra como MgO (periclasa), la cual reacciona muy lentamente con agua, transformándose en $Mg(OH)_2$, según la siguiente reacción:



Esta reacción fluye muy lentamente cuando las restantes reacciones de endurecimiento ya han ocurrido. Como el $Mg(OH)_2$ adquiere mayor volumen que el MgO, en el punto que está situado el gránulo de periclasa, puede hacer saltar la estructura de la roca de cemento y originar grietas (expansión por magnesia).

- Álcalis (K_2O y Na_2O): Compuestos que proceden principalmente de materiales margosos y arcillosos en que están presentes en forma de inclusiones finamente dispersas en el seno de los feldespatos, de los restos de mica y del mineral ilita, y además presentes en pequeña cuantía en al aplicar combustibles sólidos en las cenizas del carbón. En la cocción de cemento en el horno rotatorio se volatiliza una parte de los álcalis, en la zona de sinterización, dando lugar a un ciclo cerrado de álcalis.

- Azufre: Suele presentarse en casi todas las materias primas del cemento como sulfuro (pirita y marcasita FeS_2). A partir del azufre del combustible y del crudo se genera por combustión y por vaporización SO_2 gaseoso, el cual al combinarse con los álcalis volatilizados presentes en los gases del horno producen sulfatos alcalinos que se depositan en las partes frías del horno y en el intercambiador de calor sobre el material de reacción. Aparte de una pequeña fracción que es sustraída con el polvo de la chimenea, los sulfatos alcalinos condensados retornan a la zona de sinterización y salen con el clinker, gracias a su escasa volatilidad. Si no hay suficiente SO_2 para que reaccione la totalidad de los álcalis, se originan ciclos cerrados de carbonatos alcalinos, fácilmente volatilizables o también cloruros alcalinos, también volatilizables. Los carbonatos alcalinos, en tanto que no estén combinados en las fases del clinker, se vaporizan de nuevo en la zona de sinterización.

Puede ocurrir que un exceso de SO_2 esté todavía reaccionando con el CaCO_3 en el intercambiador, para originar CaSO_4 , y reingresar al proceso. En la zona de sinterización se descompone y reingresa al circuito de SO_2 en los gases. Una parte es sustraída por el clinker en forma de CaSO_4 . La existencia de exceso de álcalis en el crudo, sobre la cantidad que pueda combinar el azufre que contiene, presenta la ventaja de que se pueden emplear combustibles ricos en azufre sin que sean emitidas cantidades significativas de SO_2 con los gases del horno. El sulfato alcalino combinado en las fases del clinker es ventajoso para las resistencias iniciales del cemento. Por el contrario, altos contenidos de azufre pueden elevar las emisiones de SO_2 en los gases residuales, provocar taponamientos de crudo en el intercambiador (torre de precalentamiento) y favorecer la formación de anillos de costra en el interior del horno rotatorio.

- Cloruros: El crudo contiene una cantidad que va desde 0,01 y 0,02 % (en peso). En los hornos rotatorios el cloruro reacciona con los álcalis y forma cloruros que son transportables por los gases y que precipitan en el intercambio de calor. Retorna con el material en reacción, pero a diferencia de los sulfatos de nuevo son vaporizados en la zona de sinterización sin dejar resto alguno. Puesto que se depositan casi en su totalidad en el intercambiador, se forma entre la zona de sinterización y el intercambiador un circuito cerrado hasta que por razón de pegaduras o de formación de costras el horno debe detenerse.

- Fluoruros: Su contenido en las materias primas usadas en la fabricación de cemento fluctúa entre 0,03 al 0,08 %. A causa de su baja volatilidad no se forma ningún circuito cerrado. Se ha prescindido de la adición que antes se practicaba, de fluoruro de calcio a los crudos (hasta el 1 %) para hacer más fácil la cocción del clinker, porque se ha logrado combinar la cal mediante una mejor homogenización y una molienda más fina.

Es además es en la etapa de fabricación de clinker dónde entra en operación la empresa COACTIVA, empresa de co-procesamiento. Iniciativa basada en la eliminación de residuos y otros materiales en los hornos de cemento incorporándolos al proceso productivo, aprovechando así sus características para sustituir una parte de los combustibles fósiles o materias primas originales.

El co-procesamiento es la operación referida al uso de residuos en los procesos industriales de producción de cemento, cal, acero, y en centrales hidroeléctricas o cualquier otra planta de alta combustión. co-procesamiento, significa la sustitución del combustible primario y las materias primas por residuos. Es una recuperación

de energía y material a partir de los residuos. Los materiales y residuos usados se conocen como combustibles y materias primas alternativas (AFR).

Con respecto a los COT se destaca que algunas materias primas naturales como la piedra caliza, la margas y lutitas puede contener hasta 0,8% p/p de la materia orgánica ("kerogene"), este porcentaje está fuertemente determinado por las condiciones geológicas del yacimiento. Una gran parte de esta materia orgánica puede ser volatilizadas en el sistema de horno, incluso a temperaturas moderadas entre 400 y 600 ° C. Horno. Además pruebas realizadas en un horno de prueba alimentando distintos tipos de crudos, han demostrado que aproximadamente 85 a 95 % de la materia orgánica presente en las materias primas se convierten en CO₂ en la presencia de 3 % de exceso de oxígeno en los gases de escape del horno, y de 5 a 15 % puede ser oxidado a CO. Una pequeña proporción, por lo general menos del 1% del carbono orgánico total (COT) contenido puede ser emitida como compuestos orgánicos volátiles (COV), tales como los hidrocarburos (Sintef, 2006).

D. Elaboración de Cemento

Cuando se inicia esta etapa tal como se muestra en la Figura 11, el clinker comienza a ser prensado y molido junto con otros componentes (yeso y puzolana), los cuales varían según las características requeridas por cada tipo de cemento. La utilización de yeso se justifica porque retarda el fraguado del cemento, lo cual hace que el cemento sea más manejable; de no ser adicionado el cemento fraguaría tan rápido que no se podría usar en la construcción.

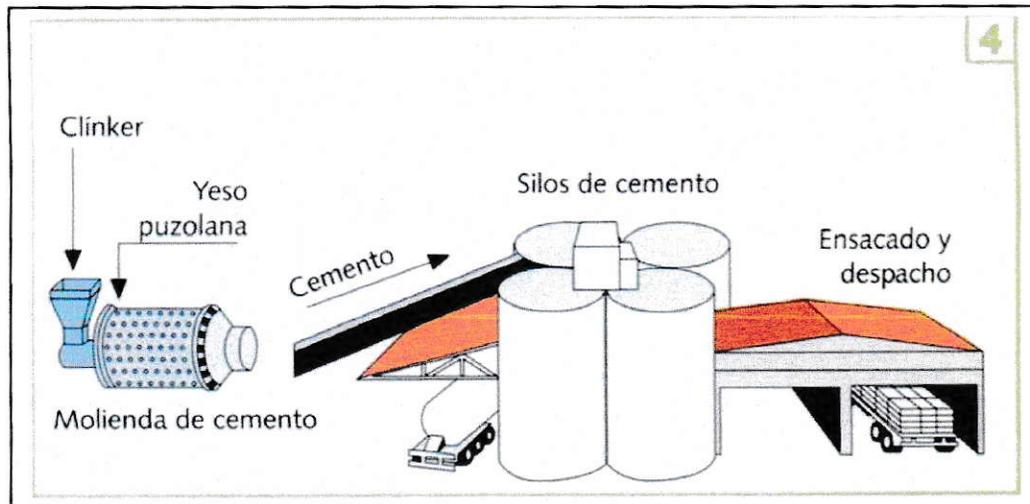


Figura 11. Proceso de Fabricación de Clinker y Elaboración de Cemento: Elaboración de Cemento, Ensamado y Despacho. (López, 2001)

Con respecto a la puzolana su utilización se justifica porque produce: mayor defensa del cemento frente a sulfatos y cloruros, mayor resistencia al agua de mar, aumento en la impermeabilidad ante la reducción de grietas en el fraguado, disminución del calor de hidratación, incremento en la resistencia a la compresión y la resistencia del acero a la corrosión, aumento de la resistencia a la abrasión, aumento de la durabilidad del cemento y disminución de la necesidad de agua.

Esta mezcla triturada de clinker, yeso y puzolana es el cemento, el cual es almacenado en silos para su posterior envasado y despacho.

Según la NCh 148/1968, los tipos de cementos que se puede encontrar son (INN, 1968):

- **Cemento Portland:** es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clinker y yeso, además se pueden adicionar otros materiales.

- **Cemento Siderúrgico:** se clasifica a su vez en dos tipos de cemento:
 - ✓ Cemento Portland Siderúrgico: es aquel cemento en donde se puede adicionar escoria básica granulada de alto horno en un porcentaje no superior al 30 %.
 - ✓ Cemento Siderúrgico: es aquel cemento en donde se puede adicionar escoria básica granulada de alto horno en un porcentaje entre 30 % y 75 %.
- **Cemento con Agregado Tipo A:** se clasifica a su vez en dos tipos de cemento:
 - ✓ Cemento Portland con Agregado Tipo A: es aquel cemento en donde se puede adicionar un agregado Tipo A en un porcentaje no superior al 30 %.
 - ✓ Cemento con Agregado Tipo A: es aquel cemento en donde se puede adicionar un agregado Tipo A en un porcentaje entre 30 % y 50%.
- **Cemento Puzolánico:** se clasifica a su vez en dos tipos de cementos:
 - ✓ Cemento Portland Puzolánico: es aquel cemento en donde se puede adicionar puzolana en un porcentaje no superior al 30 %.
 - ✓ Cemento Puzolánico: es aquel cemento en donde se puede adicionar puzolana en un porcentaje entre 30 % y 50%.

1.9.3 Normativa Ambiental de Cemento Polpaico S.A.

Para ejecutar sus proyectos productivos la empresa ha ingresado en varias oportunidades al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y por su parte la autoridad ha entregado las respectivas Resoluciones de Calificación Ambientales (RCA). A saber:

- **RCA 690 “Utilización de Mezcla Carbón-Coque de Petróleo como combustible en Planta Cerro Blanco” (28 de Noviembre de 2002):** Proyecto que consiste en la sustitución del combustible carbón por coque de petróleo hasta en un 80 % del consumo energético total del Horno 1 (H-1) y Horno 3 (H-3) de la Planta Polpaico. En tal situación, el consumo de coque de petróleo alcanzará 44,401 ton/año en el H-1 y 15,614 ton/año en el H-3 (CONAMA RM, 2002).

- **RCA 564 “Ampliación del Uso de Combustible de Sustitución y Materias Primas Alternativas en Planta Cerro Blanco” (17 de Diciembre de 2003):** Proyecto que modifica las actividades actuales de la Planta Polpaico, aumentando el uso de combustibles de sustitución (CS), y por consiguiente, disminuyendo el consumo de combustibles fósiles en los hornos cementeros (Horno 1 y Horno 3). Además incluye la utilización de materias primas alternativas (MPA) adicionales a las ya usadas en la actualidad para ambos hornos. Actualmente en la Planta se utilizan combustibles líquidos y sólidos para alimentar los hornos. Los combustibles tradicionales son el carbón bituminoso y coque de petróleo, los cuales serán reemplazados en parte, por combustibles de Sustitución, siendo éstos: Combustibles de Sustitución Líquidos (CSL), Combustibles de Sustitución Sólidos Grueso (CSSg) y Combustibles de Sustitución Sólidos Finos (CSS-f) (CONAMA RM, 2003).

- **RCA 365 “Optimización Operacional Co-procesamiento Planta Cerro Blanco” (8 de mayo de 2009):** Proyecto que optimiza los servicios entregados por las existentes instalaciones de Cemento Polpaico S.A., incorporando una nueva bodega a las instalaciones para el almacenamiento temporal de residuos no co-procesables para su posterior envío a destinatario autorizado. La nueva bodega para almacenar los materiales no co-procesables es

de una superficie aproximada de 60,7 m² y esta ubicada al interior de la plataforma de acondicionamiento del proyecto, sin ser necesaria una superficie adicional. Actualmente la plataforma de Acondicionamiento (en lo adelante Coactiva) recibe residuos, subproductos, productos y otros materiales con características específicas desde distintos orígenes, los cuales son acondicionados para generar combustibles de sustitución por medio de procesos mecánicos y físicos como mezcla, impregnación, homogenización, trituración, y clasificación por tamaños. En la Tabla 11 se indican aquellos residuos peligrosos que se pueden o no pueden recibir en la plataforma de acondicionamiento Coactiva (CONAMA RM, 2009).

Tabla 11. Residuos que pueden y no pueden ingresar a la plataforma de acondicionamiento Coactiva. (CONAMA, 2009)

Residuos Peligrosos no co-procesables a recibir en Plataforma	Situación en Plataforma Coactiva	Destino Final
Residuos electrónicos, ácidos y bases fuertes, pilas y baterías, ácidos minerales, lámparas halógenas y tubos fluorescentes	Almacenamiento temporal en bodega de no co-procesables	Otros destinos finales autorizados
Asbeto, gases comprimidos, PCB's, biocidas organoclorados y halogenados, residuos cianurados, residuos hospitalarios y sustancias químicas no identificadas o nuevas, resultantes de la investigación o desarrollo de actividades de enseñanza cuyo efecto en el ser humano o en el medio no se conozcan	No se recibirán ni almacenarán en la plataforma, ni en las instalaciones existentes ni en la futura bodega de no co-procesables	Otros destinos finales autorizados

Además debe contar con las condiciones de operación establecidas en la Tabla 12.

Tabla 12. Condiciones de Operación en Horno 1 de Cemento Polpaico S.A. (CONAMA, 2009)

Condición Operación	Valor
Alimentación crudo	> 70 ton/hr
Producción máxima de Clinker	2.000 ton/día
Temperatura de la llama	>2.000 ° C
Temperatura de sinterización	>1.100 ° C
Temperatura aire secundario	700 ° C – 1.200 ° C
Tiempo de residencia del material	> 20 min
Tiempo de residencia de los gases	> 6 seg
Nivel CO ₂ a la salida del precalentador	< 0,2 % > 0,4 %
Nivel O ₂ a la salida del precalentador	> 2,5 %
Niveles de NOx a la salida del precalentador	> 400 ppm
Sistemas de control de procesos	Control vía PLC, monitoreo ILTIS y LINKMAN

- **RCA 414 “Unidad Procesadora de Filler” (26 de mayo de 2009):**

Proyecto que tiene por objetivo la producción de un nuevo producto denominado “filler”, mediante un proceso que consiste en la separación a través de hidrociclones y secado del relave de flotación (residuo que se deposita en el tranque de relaves N ° 5) en una nueva unidad llamada “Unidad procesadora de filler”. Este nuevo producto (filler) podrá ser utilizado como materia prima en la producción de cemento que se realiza en la misma planta, reemplazando a la puzolana, o puede ser vendido a terceros como materia prima para la elaboración de cerámicas y otros productos. Además se podrá aumentar el tiempo de vida útil del tranque de relaves N ° 5 hasta aproximadamente el 2038.

- **RCA 364 “Tranque de Relaves N ° 5” (23 de julio de 1998):** Proyecto cuyo objetivo es la creación de un tranque de relaves que re-emplace al ya existente (tranque de relaves N ° 4), ya que el tiempo de vida útil de éste ha llegado a su fin. El nuevo tranque se localizará cercano a la planta, en una rinconada que queda flanqueada por los cerros Las Mesas, Altos de Polpaico y Las Tres

Hermanas, entre las coordenadas UTM 6.327.900 Norte – 329.700 Este y 6.329.000 Norte – 330.300 Este, en la comuna de Tiltil.

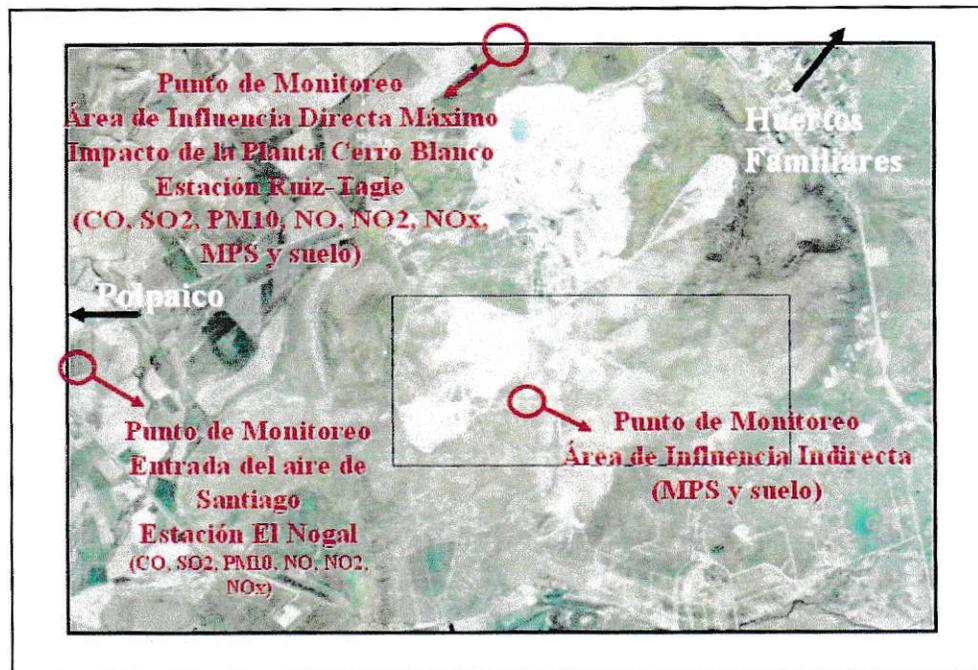


Figura 12. Puntos de Monitoreo de Calidad de Aire, Agua y Suelo. (Fernaldt, 2003)

Considerando la normativa nacional vigente, las RCA de Cemento Polpaico S.A, las áreas de influencia que pueden ser afectadas por la actividad propia de la empresa (Comunidad Huertos Familiares, Comunidad Polpaico y Zona de Entrada de Aire a la Cuenca de Santiago), según lo indicado en la Figura 12; es necesario realizar una serie de mediciones que permitan monitorear la calidad del aire, agua y suelos que a continuación se detallan:

Componente Aire

Por cumplimiento de la RCA 564/2003 y RCA 690/2003 (autorización uso de AFR y Petcoke), es necesario realizar cada doce meses un Ensayo de Verificación (EV).

Este EV es realizado por un laboratorio autorizado por el Sesma y se monitorean los siguientes contaminantes:

- ✓ Emisiones de MP, NO_x, SO₂, CO, COV, COT, Halógenos, Cianuro, Benceno, Amoniaco, Metales Pesados, Dioxinas y Furanos.
- ✓ Análisis químico para Crudo, Clinker, Petcoke, Combustibles de Sustitución, Cemento y Probeta Cemento.

En la planta existen 37 fuentes puntuales que poseen sistemas de captura de MP-10 y por cumplimiento del PPDA RM (DS 66/2009 MINSEGPRES) es necesario realizar una vez al año mediciones isocinéticas de material particulado por un laboratorio autorizado por el Sesma.

Además por cumplimiento del éste mismo Plan de Prevención y descontaminación de la Región Metropolitana es necesario realizar mediciones de NO_x en la chimenea del Horno 1. Estas mediciones deben ser realizadas por un laboratorio autorizado por el Sesma y deben durar 4 horas.

Por cumplimiento de la RCA 564/2003 (autorización uso de AFR), es necesario monitorear por un laboratorio autorizado por el Sesma la calidad del aire y meteorología de forma mensual en la estaciones de Ruiz Tagle y Nogales; y de forma trimestral en la estación de Huertos Familiares.

Además la empresa tiene instalado un SMCE a la salida de la chimenea del Horno 1 (Figura 42 en Anexos), en donde se monitorean continuamente los siguientes contaminantes: material particulado, CO, CO₂, SO₂, NO y COT.

Componente Suelo

Por cumplimiento de la RCA 364/1998 (autorización funcionamiento del Tranque 5), es necesario realizar mediciones mensuales de Material Particulado Sedimentable (MPS) por un laboratorio autorizado por el Sesma, en las estaciones de Ruiz Tagle y Portezuelo. Además se monitorea cada seis meses el MPS de la estación de Huertos Familiares.

Por cumplimiento de las RCA 564/2003 y RCA 690/2003 (autorización uso de AFR y Petcoke), es necesario realizar mensualmente análisis de suelo por un laboratorio autorizado por el Sesma, en las estaciones de Portezuelo y Ruiz Tagle.

Componente Agua

Por cumplimiento de la Resolución Sanitaria de la Cemento Polpaico (Res.10579/2001) se debe monitorear una vez al año la Laguna de Tratamiento de Aguas Servidas y algún punto de consumo de agua potable (planta o comunidad vecina) para cumplir con la NCh 409/2005.

Por cumplimiento de la RCA 364/1998 (funcionamiento del Tranque 5), es necesario monitorear trimestralmente según la NCh 1333/1978 los siguientes puntos: Pozo 10, Pozo 14, Pozo Huertos Familiares y Tranque 5.

1.10 Revisión de Antecedentes

El principal y único antecedente disponible en Cemento Polpaico S.A en torno a la problemática de estudio es el "Expulsion Test", que es un estudio desarrollado por HGRS (grupo de investigación de Holcim) el 23 de Mayo de 2008 con el objetivo de clarificar el origen y la composición de las emisiones de COV de Planta Polpaico; además de cuantificar el nivel de emisiones provenientes de la materia prima y de los agentes de la flotación (Stemmler, 2008).

En este estudio se colectaron 11 muestras de materias primas del proceso, las cuales fueron sometidas a análisis de distintos tipos, entre ellos podemos mencionar:

- Carbono orgánico total (COT*): para muestras sólidas se utiliza un analizador LECO SC-144 DR de sulfuro/carbono y para muestras líquidas se utiliza un analizador LECO RC-412 de carbón. Las muestras deben ser tratada con ácido clorhídrico para eliminar el carbonato, luego las muestras sólidas deben ser combustionadas en una atmósfera de 1400 ° C y las muestras líquidas en una atmósfera de 50 ° C, en donde ocurre la detección de los compuestos orgánicos mediante la detección del espectro infrarrojo del gas CO₂.
- Espectrometría de Masas Cromatografía de Gases (GC-MS): las muestras fueron tratadas con metanol acidificado para producir los esteres metílicos del acido graso que se pueden detectar fácilmente por GC-MS. Posteriormente 1 Kg de las muestras fueron calentadas a 450 ° C en una atmósfera de helio, la evolución de las trazas de los gases se capturan en una micro-trampa fría a menos de 100 ° C y se inyectan posteriormente en el GC-MS.

- Pruebas de expulsión para las emisiones de COV: estas pruebas son desarrolladas en un equipo propio de HGRS, en la Figura 13 se muestra el diagrama de este equipo. La muestra se calienta en un flujo de gas a una temperatura ambiente de alrededor 750 ° C y la evolución de los gases son detectados por un espectrómetro de masas de ionización química (CI-MS) y un detector de ionización de llama (FID). Este análisis da lugar a la cuantificación de los principales componentes orgánicos en la emisión de COV y a las emisiones totales de COV (mg C/N m³).

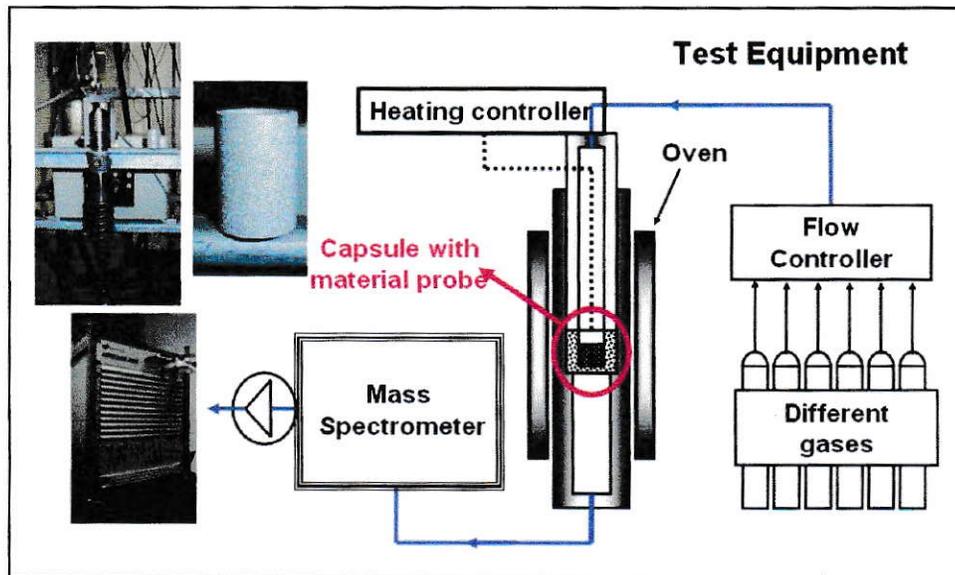


Figura 13. Diagrama de Equipos utilizados en el Expulsion Test. (Holcim, 2008)

Como se indica en la Figura 14, la muestra de colector flotación contiene principalmente ácidos grasos saturados e insaturados con longitudes de cadena de carbono de 14, 16, 18, 20 y 22 átomos de carbón; encontrándose en mayor proporción los siguientes ácidos grasos: Ácido Mirístico, Ácido Palmítico, Ácido Estéarico, Acido Oleico, Acido Linoléico y Ácido Araquidónico.

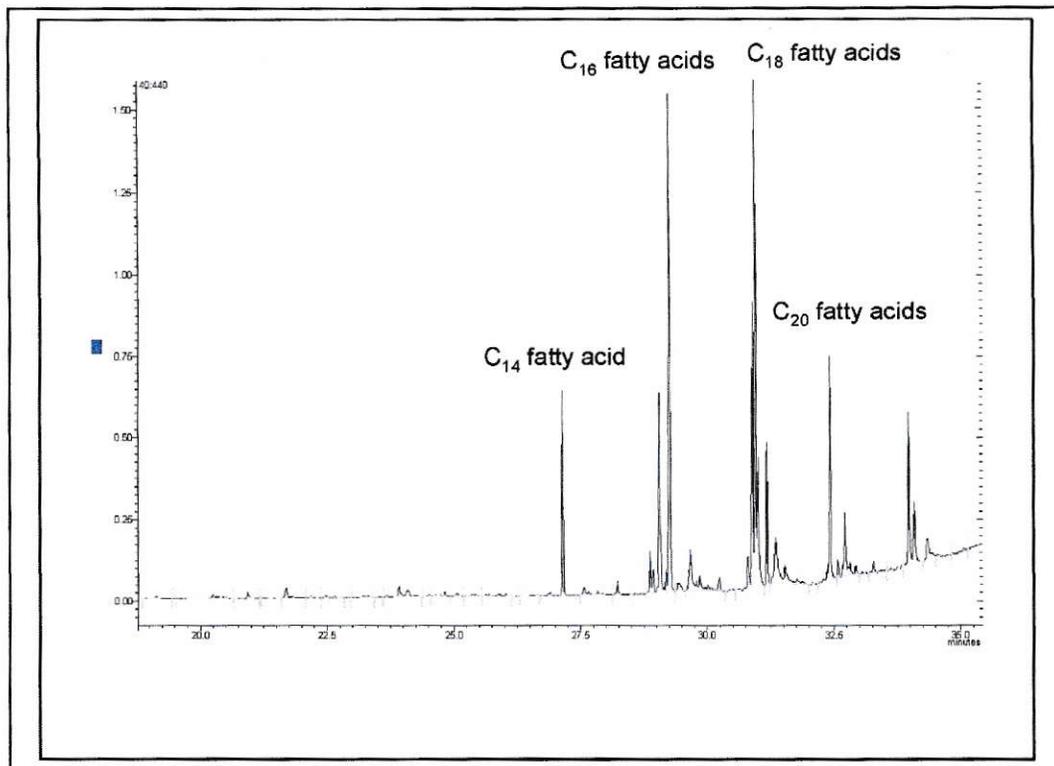


Figura 14. Cromatograma de la Muestra Colector Flotación. (Stemmler, 2008)

Como se indica en la Figura 15, en la muestra de agente espumante se encontró que la muestra contiene principalmente el alcohol semi-volátil 2-Etil Hexanol y los productos de la condensación: 2-Etil Hexil bi Eter y 2-Etil Hexil 2-Etil Hexanoato.

Además al observar la Figura 16 se aprecia que esta muestra expelió grandes cantidades de fragmentos pequeños de COV y de compuestos monoaromáticos (benceno, tolueno, xilenos: BTX). La emisión principal ocurrió en el rango de temperaturas entre 300 y 500 ° C.

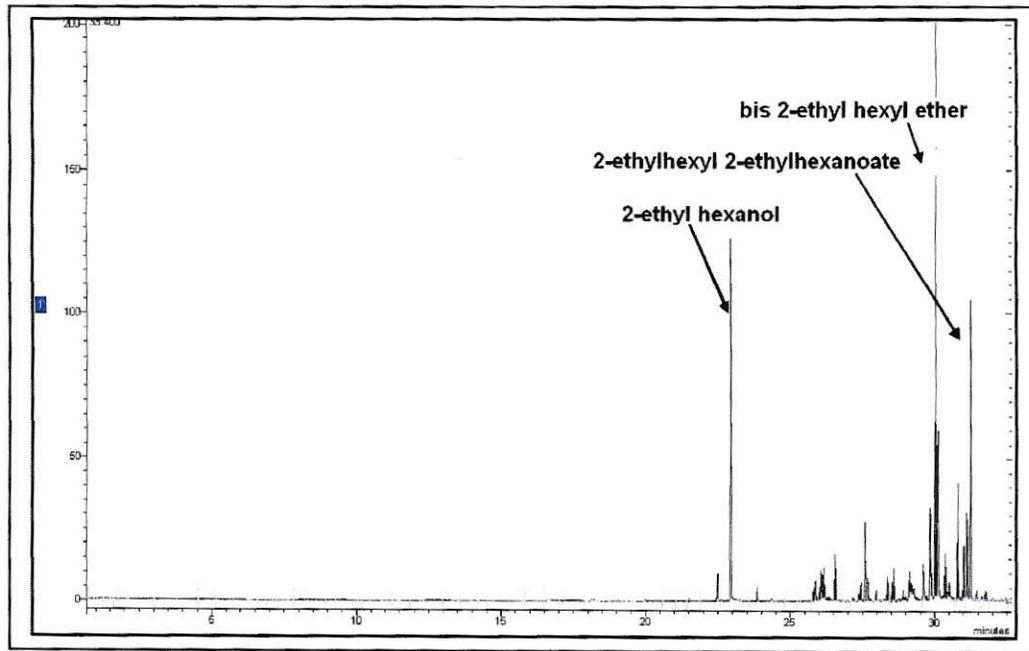


Figura 15. Cromatograma de la Muestra Agente Espumante. (Stemmler, 2008)

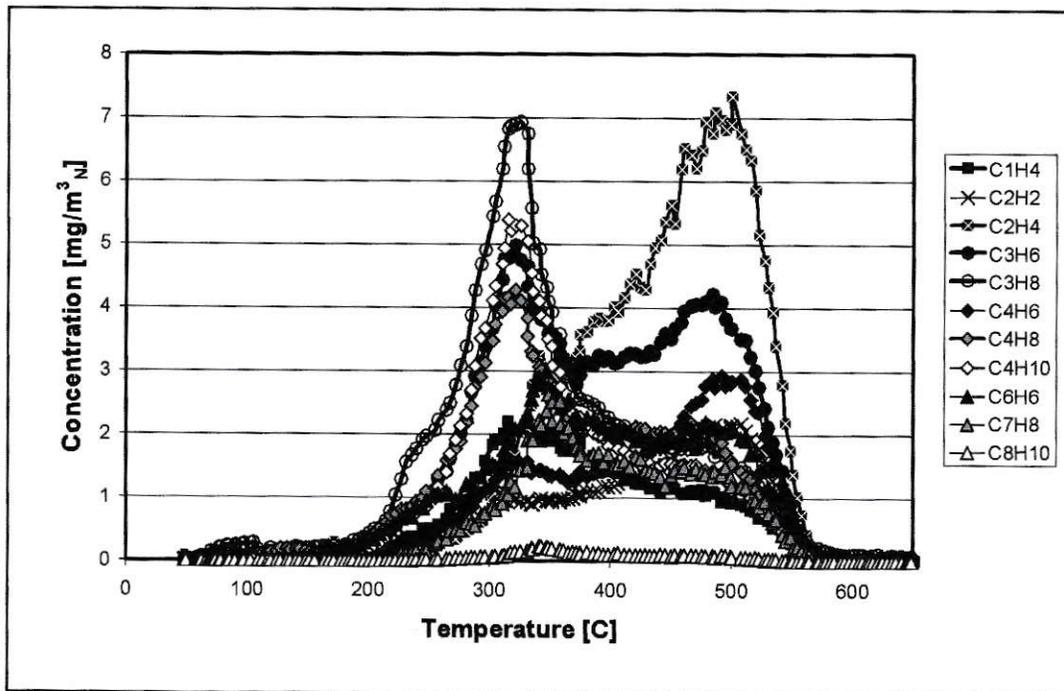


Figura 16. Comportamiento de la Expulsión de la Muestra del Colector Flotación. (Stemmler, 2008)

Además al observar la Figura 17 se aprecia que esta muestra expelió predominante compuestos de C3 y C4. La emisión principal ocurrió en el rango de temperaturas entre 100 y 300 ° C.

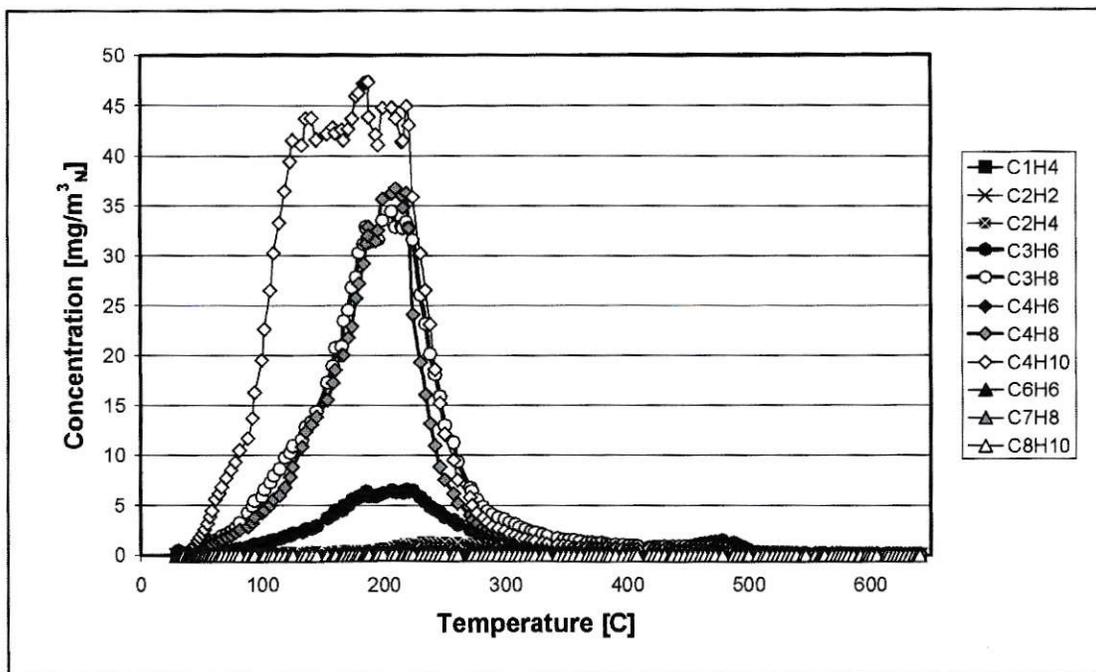


Figura 17. Comportamiento de la Expulsión de la Muestra del Agente Espumante. (Stemmler, 2008)

En la Tabla 13 se indican las masas expelidas de las 11 muestras, se destaca que en la mayoría de las muestras (Alimentación Flotación Caliza, Concentrado Flotación Caliza, Concentrado Flotación Poroso, Pasta Alimentación Molino caolin/bauxita y Queque Horno 1) el compuesto con mayor abundancia es el Propeno. Además en ésta se observa que las muestras de concentrado flotación caliza y poroso emiten más COV en comparación a las muestras de alimentación flotación caliza y poroso. La muestra de alimentación de crudo al Horno 1, alcanza su máximo de emisión de COV a los 300 ° C, liberando aproximadamente 11 mg/N m³ de compuestos orgánicos volátiles.

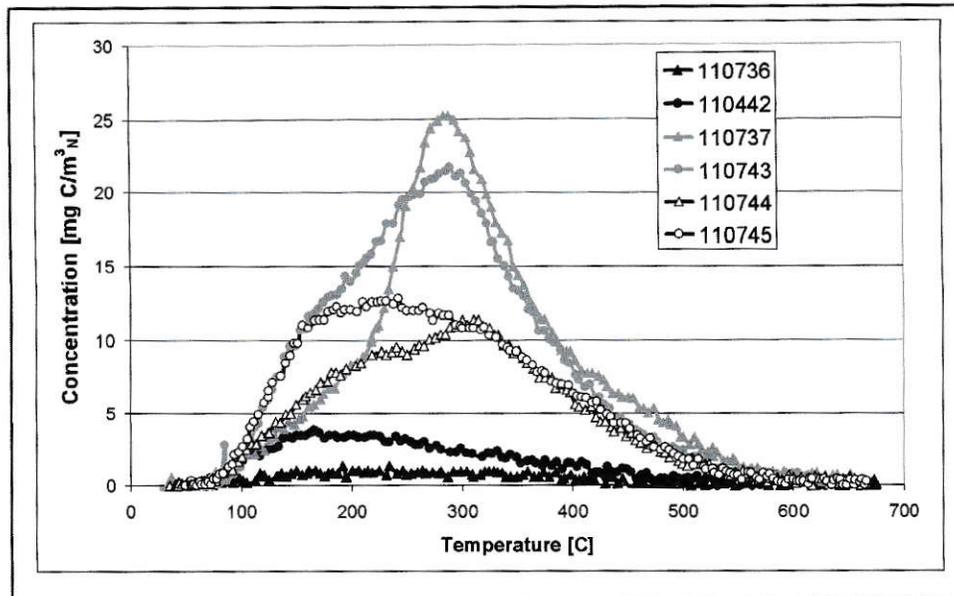


Figura 18. Comparación de las Expulsiones de COV de las Muestras de la Materia Prima antes del Proceso de Flotación (#110736 Alimentación Flotación Caliza, #110742 Alimentación Flotación Poroso; símbolos negros), de las Muestras después del Proceso de Flotación (#110737 Concentrado Flotación Caliza, #110743 Concentrado Flotación Poroso; símbolos grises), y de Muestras de Alimentación a Hornos (#110744 Queque Horno 1, #110745 Queque Horno 3; símbolos vacíos). (Stemmler, 2008)

En la Tabla 15 se presenta un resumen de los principales resultados del contenido de COT en las muestras, y el contenido de COV durante las pruebas de expulsión en cada una de las muestras. Se destaca que la muestra que entra directamente al Horno 1 posee un contenido de COT de 0,15 %, libera 68 mg C/Kg de COV; lo cual significa que por la chimenea del Horno 1 se estarían liberando 41 mg C/N m³ y durante la recolección de ésta muestra se detectó como promedio de emisiones de COV 46 mg C/m³ N (Tabla 14).

Tabla 13. Masas Expelidas de Materias Primas y Reactivos del Proceso mediante Expulsion Test. (Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos desde el informe: "Polpaico Flotation Process: Contribution of the Raw Material Components, the Additives and the Process Steps to the VOC Emissions of the Cement Plant")

Masas Expulsadas (mg/Kg)	Alimentación Flotación Caliza	Alimentación Flotación Poroso	Concentrado Flotación Caliza	Concentrado Flotación Poroso	Caolín	Bauxita	Caliza Alta Ley (conchuela)	Pasta Alimentación Molino (caolín/bauxita)	Queque Horno 1	Colector Flotación	Agente Espumante
Metano	1,8	2,4	19,2	21,3	4,3	16	10,1	4,1	10,3	319	2.400
Etino ^{a)}	0,3	0,5	3	3,0	0,5	2,1	1,2	0,5	1,5	300	1.300
Compuestos-C2	1,1	1,2	8,9	8,4	1,1	6,3	3,0	1,4	5,0	876	5.000
Propeno	3,5	5,1	23,6	25,0	3,4	4,0	3,9	9,7	16,9	792	18.200
Propano	1,2	4,4	12,7	15,5	0	0	0	7,8	10,0	740	71.700
Butadieno	0,6	0,7	6,6	6,9	0,6	1,2	0,7	1,1	4,7	398	1.700
Butano	0,8	7,0	4,3	6,5	0	0	0	1,5	3,9	537	119.800
Buteno	0,5	6,0	9,8	11,8	0	0	0	2,5	6,8	550	62.400
Benzeno	1,7	2,2	15,5	13,1	1,3	24	3,1	2,7	12,2	470	2.700
Tolueno	0,9	1,7	10,5	6,7	0,3	1,1	1,2	0,6	5,5	307	1.800
Xyleno	0	0,3	0,7	1,7	0	0	0	0,2	0,3	22	270
COV ^{b)}	10	27	101	105	12	51	22	27	68	-	-
COV ^{c)}	9,1	25	86	88	8,8	39	14	24	60	-	-
COV ^{d)}	9,3	28	150	160	-	-	-	-	86	-	-

a) Etino = acetileno

b) Suma de compuestos orgánicos volátiles expelidos calculados a partir de compuestos orgánicos (CH₄, C₂H₂, etc.) y factores específicos

c) COV No-metano.

d) COV total según lo determinado por un detector de FID, que detecta la señal de la suma de todo los COVs.

Tabla 14. Concentración de Emisiones para el Horno 1; normalizadas a 25 ° C, seco y 10 % de O₂. (Stemmler, 2008)

Fecha/Hora	TOC (mg/Nm ³)	NO ₂ (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	CO ₂ (mg/Nm ³)	SO ₂ (mg/Nm ³)	HCl (mg/Nm ³)	Polvo (mg/Nm ³)	NH ₃ (mg/Nm ³)	H ₂ O (%)	Temperatura (° C)	O ₂ (%)	Presión (KPa)
24.03.2008/23:16	-	317,3	519,8	9,2	-	0,7	35,4	0,8	12,1	111,5	13,1	96,4
25.03.2008/00:40	43,8	328,5	483,9	9,3	-	0,6	39,5	0,8	12,3	111,1	13,1	97,7
25.03.2008/02:05	40,8	347,1	378,9	9,2	-	0,6	38,1	0,8	12,4	113,8	13,0	98,2
25.03.2008/03:29	43,7	478,9	456,9	9,3	0,0	0,6	40,4	0,8	12,3	112,6	13,1	99,1
25.03.2008/04:54	40,3	387,0	364,7	9,3	-	0,5	38,2	0,8	12,4	111,6	13,1	98,8
25.03.2008/06:18	42,7	401,3	373,2	9,2	-	0,5	37,6	0,8	12,2	110,2	13,1	98,6
25.03.2008/07:42	36,0	397,5	234,6	8,8	1,0	0,6	39,1	0,8	10,6	108,7	14,0	99,3
25.03.2008/09:07	36,8	370,8	331,0	9,4	-	0,6	40,5	0,7	12,1	106,4	13,5	98,0
25.03.2008/10:31	35,9	351,0	278,0	9,4	1,2	0,7	68,4	0,7	11,9	116,1	13,5	95,9
25.03.2008/11:55	36,3	242,4	263,6	9,5	-	0,7	44,8	0,7	12,1	111,8	13,5	94,5
25.03.2008/13:20	38,0	271,7	356,0	9,4	-	0,6	45,0	0,7	12,4	114,6	13,2	92,9
25.03.2008/14:44	39,8	310,9	380,5	9,5	-	0,7	41,7	0,7	12,3	114,2	13,2	92,5
25.03.2008/16:09	41,4	358,3	424,9	9,5	-	0,8	49,0	0,7	12,1	189,4	13,2	92,4
25.03.2008/17:33	40,1	295,7	404,6	9,4	-	0,8	47,2	0,7	12,1	185,8	13,3	92,7
25.03.2008/18:57	45,7	274,3	276,6	8,6	3,3	1,2	45,1	1,5	11,1	179,3	13,9	93,6
25.03.2008/20:22	58,2	441,3	555,9	9,4	0,2	0,6	37,6	0,6	12,3	123,6	13,1	94,6
25.03.2008/21:46	54,2	394,2	538,3	9,5	0,0	0,6	35,7	0,6	12,2	122,9	13,2	96,2
25.03.2008/23:10	45,4	344,6	392,9	9,5	0,1	0,6	45,3	0,6	11,4	121,4	13,4	97,0
26.03.2008/00:40	41,0	223,2	337,3	9,6	-	0,5	44,2	0,6	11,2	112,4	13,4	98,0

Tabla 15. Resumen Resultados Análisis Químicos y Expulsión Test. (Stemmler, 2008)

Nombre de Muestra	Tipo de Muestra	Contenido de Agua (%)	Contenido de COT* (%)	Contenido de COV (mg C/kg)	Expulsión de COV (mg C/Nm ³)
Alimentación Flotación Caliza	Líquida	20,1	0,1	10	6
Alimentación Flotación Poroso	Líquida	13,9	0,26	27	15
Concentrado Flotación Caliza	Líquida	23	0,15	101	-
Concentrado Flotación Poroso	Líquida	22,3	0,27	105	-
Caolín	Sólida	6,6	0,09	12	-
Bauxita	Sólida	8,1	0,29	51	-
Caliza Alta Ley (conchuela)	Sólida	14,1	0,05	22	12
Pasta Alimentación Molino (caolín/bauxita)	Sólida	29,7	0,12	27	-
Queque Horno 1	Sólida	14,4	0,15	68	41
Colector Flotación	Líquida	98	2,4	-	-
Agente Espumante	Líquida	0	66	-	-

De este estudio se desprenden las siguientes conclusiones:

- La fracción gruesa de la caliza contiene pequeñas cantidades de COT que dan lugar a bajas emisiones de COV; mientras que la fracción fina de la caliza (poroso) posee un contenido orgánico natural algo más alto.
- Las emisiones de COV se incrementan al adicionar el aditivo de flotación a la materia prima.
- El agente colector proviene de grasas naturales, con cadenas desde 14 a 22 átomos de carbono.
- El agente espumante es una mezcla sintética relativamente compleja de éteres y de ésteres, su principal componente es el 2-etil-hexanol (punto de ebullición superiores a 180 ° C).
- Los compuestos orgánicos del agente de la flotación no se emiten directamente a la atmósfera, ya que necesitan ser fraccionados hacia moléculas orgánicas más pequeñas con 1 a 4 átomos de carbono, transformándose en compuestos monoaromáticos de alta volatilidad.
- Las emisiones en los hornos provienen principalmente de las materias primas procesadas en la flotación.

- La emisión de COV basadas en la alimentación del Horno 1 fue de 41 ± 8 mg C/N m³, mientras que en el día del muestreo de material la emisión promedio de COV medida en el Horno 1 fue de 46 ± 7 mg C/m³N.

1.11 Objetivos

1.11.1 Objetivo General

Determinar el efecto de la alimentación de crudo y combustibles sobre las emisiones de COT en Horno 1 Rotatorio de Clinker

1.11.2 Objetivos Específicos

- Estudiar antecedentes disponibles sobre las emisiones de COT por la chimenea del Horno 1.
- Determinar la presencia de estructuras orgánicas en el ácido graso empleado en el proceso de flotación.
- Determinar contenido orgánico en muestras de materias primas y combustibles.
- Evaluar evolución de emisiones de COT.
- Determinar la correlación entre emisiones de COT con parámetros del proceso.
- Determinar condiciones de combustión en el Horno 1.
- Formular modelo de balance de masa de COT.

II MATERIALES Y MÉTODOS

En base a los antecedentes disponibles, se determinaron los tipos de análisis químicos a realizar en muestras de materias primas, reactivos y combustibles.

Posteriormente se tomaron muestras del ácido graso, materias primas y combustibles empleados en el proceso con el fin de conocer la composición química de éstos.

Adicionalmente, se elaboró un protocolo de pruebas en el Horno 1 con el fin de monitorear la emisiones de COT y correlacionarlas con los distintos flujos de entrada (combustibles petcoke, CSSf, CSSg, CSL y crudo). Paralelamente a las pruebas se midieron algunos gases de combustión (CO, NO_x y O₂) con el fin de establecer la existencia de combustión ideal en cada una de las pruebas.

Finalmente, tomando los resultados de los análisis químicos y los flujos de entrada y salida del sistema, se elaboró un modelo de balance de masa de COT.

2.1 Métodos de Análisis Químicos

2.1.1 Caracterización de ácido graso

El método empleado en la caracterización del ácido graso utilizado en la etapa de flotación, se detallan a continuación (AOCS, 1997):

Este método permite determinar la composición en % de ácidos grasos de los aceites marinos y ésteres de aceites marinos y la concentración en mg/g del ácido eicosapentaenoico (EPA) y ácido docosahexaenoico (DHA); por medio de cromatografía de gases-liquido en columna capilar.

Aparatos y Materiales

- ✓ Cromatógrafo de gases con sistema de inyección capilar y un detector de ionización de llama (FID) capaces de satisfacer los siguientes requisitos mínimos :
 - a. Puerto de inyección 250 ° C
 - b. Detector 270 ° C
 - i. Perfil de temperatura del horno (Temperatura inicial 170 ° C, Rango de programa 1 ° C/min., Temperatura final 225 ° C)
- ✓ Columna capilar GLC debe ser de sílice fundida flexible, con una longitud de 25 metros o más y de 0,20 a 0,35 mm de diámetro interno. La fase líquida debe ser Carbowax-20M o un poliglicol equivalente
- ✓ Transporte de gas hidrógeno o helio con un requerimiento de pureza de 99,99% o superior
- ✓ Temperatura constante, baño de agua o bloque de calefacción en seco que mantenga a 100 ° C
- ✓ Tubos con tapa rosca de 16*125 mm, con tapas forradas con teflón a prueba de fugas
- ✓ Vial, tornillo o tapa ondulada de 12 mL
- ✓ Pipetas volumétricas de 1 y 2 mL
- ✓ Pipeta tipo Pasteur
- ✓ Matraz volumétrico de 25 y 100 mL

- ✓ Balanza analítica de $\pm 0,0001$ g
- ✓ Fuente de nitrógeno seco
- ✓ Hidróxido de Sodio de grado reactivo
- ✓ Alcohol metílico de grado reactivo
- ✓ BF_3 en 12% en metanol
- ✓ Isooctano de grado reactivo
- ✓ Cloruro de Sodio de grado reactivo
- ✓ $\text{C}_{23:0}$ metil éster
- ✓ $\text{C}_{23:0}$ etil éster
- ✓ Soluciones:
 - a. Hidróxido de Sodio (NaOH) 0,5 N: disolver 2,0 g de NaOH en metanol y llevar a 100 mL con metanol.
 - b. Cloruro de Sodio (NaCl): solución saturada, disolver 36 g de NaCl en 100 mL de agua destilada.

Procedimiento

1. Pesar (con precisión de $\pm 0,1$ mg) aproximadamente 25 mg de $\text{C}_{23:0}$ metil o etil éster (apropiado para el substrato a ser analizado) IS (patrón interno) dentro de un matraz volumétrico de 25 mL con isooctano.
2. Con una pipeta tomar una alícuota de 1,0 mL del IS dentro del tubo de cultivo.
3. Evaporar el solvente.
4. Pesar con precisión ($\pm 1,0$ mg) no más de 15 mg de éster en el tubo que contiene la IS, agregar 1 mL de isooctano, cubrir con nitrógeno, tapar y mezclar bien.
5. Inyectar 1 a 2 μL del gas apropiado para las condiciones de cromatografías adecuadas.

2.1.2 Determinación de carbono orgánico total (COT) en materias primas y combustibles

El método empleado en la medición del carbono orgánico total (COT) presentes en la materia prima y combustibles, se detalla a continuación (CESMEC, 2010):

Procedimiento

1. Secar la muestra de 5 (g) como mínimo a 105 ° C durante dos horas, posteriormente moler (pulverizar) y homogeneizar de manera de obtener una muestra representativa para el análisis.
2. Tomar una porción, en duplicado, de la muestra original seca y leer en LECO (Combustión / Detección IR). Esta determinación corresponde al carbono Total.
3. A continuación pesar 5 g de muestra, en duplicado, (con precisión de 0,01 g) y adicionar 150 mL de ácido clorhídrico 0,1 N
4. Dejar calentar hasta ebullición tapado con vidrio de reloj por aproximadamente 2 minutos en plancha calefactora, luego retirar de la plancha.
5. Filtrar mediante gravedad o vacío, a continuación lavar con 250 mL de agua caliente previamente hervida.
6. Posteriormente secar las muestras a 105 ° C por cuatro horas aproximadamente.
7. Tomar una porción en duplicado de las muestras tratadas en ácido y leer en LECO (Combustión / Detección IR). Esta determinación corresponde al carbono orgánico total. Por diferencia se obtienen el Carbono Inorgánico Total.

2.1.3 Determinación de análisis elemental de combustibles

Los métodos empleados en el análisis elemental de combustibles utilizados en la etapa de fabricación de clinker en el Horno Rotatorio N ° 1, se indican a continuación:

- Humedad Total y Residual (ASTM D-3302)
- Contenido de Agua (ASTM D-95)
- Ceniza (ASTM D-3174)
- Hidrógeno (ASTM D-3178)
- Nitrógeno (ASTM D-3179)
- Oxígeno (ASTM D-3180)
- Azufre (ASTM D- 4239)

2.2 Muestreo de Ácido Graso, Materias Primas y Combustibles

El día de 20 de Agosto de 2009 a las 09:00 A.M. se realizó el muestreo del ácido graso por parte de personal de Cemento Polpaico S.A., tal como se indica en la Figura 19. El lugar de muestreo fue el estanque de almacenamiento de ácido graso 346 RT3. Inmediatamente colectada la muestra se envió la muestra de ácido graso al Laboratorio Socosep Ltda. para análisis.

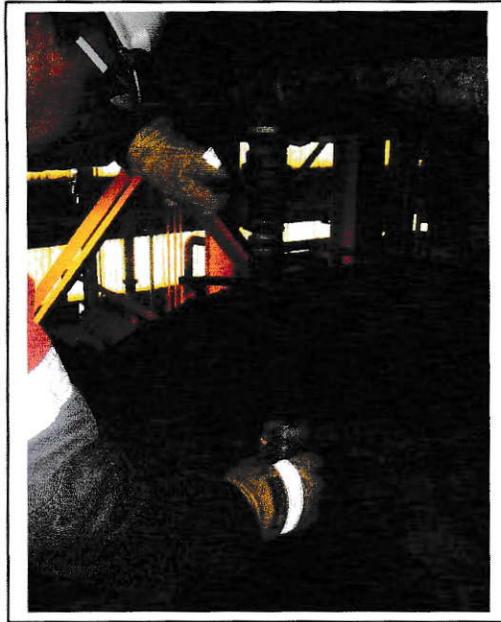


Figura 19. Lugar de muestreo de Acido Graso, estanque 346 RT3.

Durante los días 24 y 25 de Marzo de 2010 se realizó el muestreo de los combustibles (petcoke, CSSf, CSSg y CSL) por parte de personal de Cemento Polpaico S.A. A continuación se describe cada punto de muestreo de los combustibles:

- Petcoke: El punto de muestreo de este material fue en el muestreador 454-TY1 que traslada el material desde el molino de carbón hacia su alimentación al quemador del horno 1 (Figura 20)
- CSSf: El punto de muestreo de este material fue en la banda dosificadora 454-BD3. La toma de material se realiza en forma secuencial, usando una pala especial de muestreo, cada vez que el material cae en forma de cascada desde la correa transportadora (Figura 21).
- CSSg: El punto de muestreo de este material fue en la banda dosificadora 454-BP1 (Figura 22).
- CSL: El punto de muestreo se aprecia en la Figura 23.

Las muestras fueron colectadas siguiendo la programación indicada en la Tabla 16. Cada una de las muestras puntuales de combustibles se colectaron cada aproximadamente 1 hora y se almacenaron en bolsas plásticas, al finalizar el día se procedió a mezclarlas y finalmente homogeneizarlas en una muestra compuesta. Cada una de estas muestras compuestas, de 1 Kg aproximadamente cada una, fueron etiquetadas, selladas y debidamente identificadas; registrándose en cada etiqueta y planilla un código por muestra y fecha de medición. Inmediatamente, las muestras de combustibles fueron enviadas al laboratorio CESMEC para análisis de elemental de éstos.

Tabla 16. Frecuencia de Muestreo de Combustibles durante 24-25 de Marzo de 2010.

Nombre de Muestra	Día de Muestreo	Hora de Muestreo
Petcoke	24-03-2010	10:25/11:26/11:27/14:31/15:40/16:25
	25-03-2010	10:32/11:28/12:25/14:25/15:27
CSSf	24-03-2010	14:31/15:40/16:25
CSSg	25-03-2010	10:32/11:28/12:25
CSL	25-03-2010	14:25/15:27

Durante el periodo comprendido entre los días 24 al 28 de Septiembre de 2010 se realizó el muestreo de materias primas y combustibles (alimentación flotación poroso, alimentación flotación caliza, concentrado flotación poroso, concentrado flotación caliza, alimentación de crudo, petcoke, CSSg, CSSf y clinker) por parte de personal de Cemento Polpaico S.A. A continuación se describe cada punto de muestreo de los combustibles:

- Alimentación flotación poroso: El punto de muestreo se aprecia en la Figura 24.
- Alimentación flotación caliza: El punto de muestreo se aprecia en la Figura 25.
- Concentrado flotación poroso: El punto de muestreo se aprecia en la Figura 26.
- Concentrado flotación caliza: El punto de muestreo se aprecia en la Figura 27.

- Crudo: Se muestreó el producto directamente en la descarga de la tolva antes de ser transportado hacia el tambor secador, en el muestreador 414-TL2 (Figura 28).
- Petcoke: El punto de muestreo de este material fue en el muestreador 454-TY1 que traslada el material desde el molino de carbón hacia su alimentación al quemador del horno 1 (Figura 20)
- CSSf: El punto de muestreo de este material fue en la banda dosificadora 454-BD3. La toma de material se realiza en forma secuencial, usando una pala especial de muestreo, cada vez que el material cae en forma de cascada desde la correa transportadora (Figura 21).
- CSSg: El punto de muestreo de este material fue en la banda dosificadora 454-BP1 (Figura 22).
- Clinker: El punto de muestreo fue en el muestreador 481-TP1 (Figura 29).

Las muestras fueron colectadas siguiendo la programación indicada en la Tabla 17. Cada una de las muestras puntuales de combustibles se colectaron cada aproximadamente 1 hora y se almacenaron en recipientes plásticos, al finalizar el día se procedió a mezclarlas y finalmente homogeneizarlas en una muestra compuesta. Cada una de estas muestras compuestas, de 500 g. aproximadamente cada una, fueron etiquetadas, selladas y debidamente identificadas; registrándose en cada etiqueta y planilla un código por muestra y fecha de medición. Inmediatamente, las muestras de combustibles fueron enviadas al laboratorio CESMEC para análisis de carbono orgánico total (COT) de éstos.

Tabla 17. Frecuencia de Muestreo de Combustibles y Materias Primas durante 24-28 de Septiembre de 2010.

Nombre de Muestra	Día de Muestreo	Hora de Muestreo
CSSg	28-09-2010	09:00/11:00/13:00
CSSf	24-09-2010	08:50/10:50/17:35
Petcoke	24-09-2010	10:30
	27-09-2010	-
	28-09-2010	14:30
Crudo	24-09-2010	08:30/10:30/12:30
	27-09-2010	14:30/16:30
	28-09-2010	08:30/10:30/12:30/14:30/16:30
Clinker	24-09-2010	08:30/10:30/12:30
	27-09-2010	14:30/16:30
	28-09-2010	08:30/10:30/12:30/14:30/16:30
Alimentación Flotación Poroso	24-09-2010	08:30/10:30/12:30
	27-09-2010	14:30/16:30
	28-09-2010	08:30/10:30/12:30/14:30/16:30
Alimentación Flotación Caliza	24-09-2010	08:30/10:30/12:30
	27-09-2010	14:30/16:30
	28-09-2010	08:30/10:30/12:30/14:30/16:30
Concentrado Flotación Poroso	24-09-2010	08:30/10:30/12:30
	27-09-2010	14:30/16:30
	28-09-2010	08:30/10:30/12:30/14:30/16:30
Concentrado Flotación Caliza	24-09-2010	08:30/10:30/12:30
	27-09-2010	14:30/16:30
	28-09-2010	08:30/10:30/12:30/14:30/16:30



Figura 20. Lugar de muestreo de Alimentación Petcoke al Horno 1, muestreador 454-TY1.

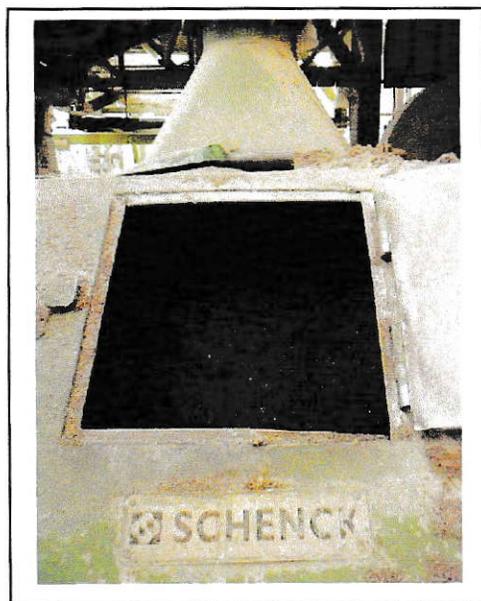


Figura 21. Lugar de muestreo de Alimentación CSSf al Horno 1, banda dosificadora 454-BD3.

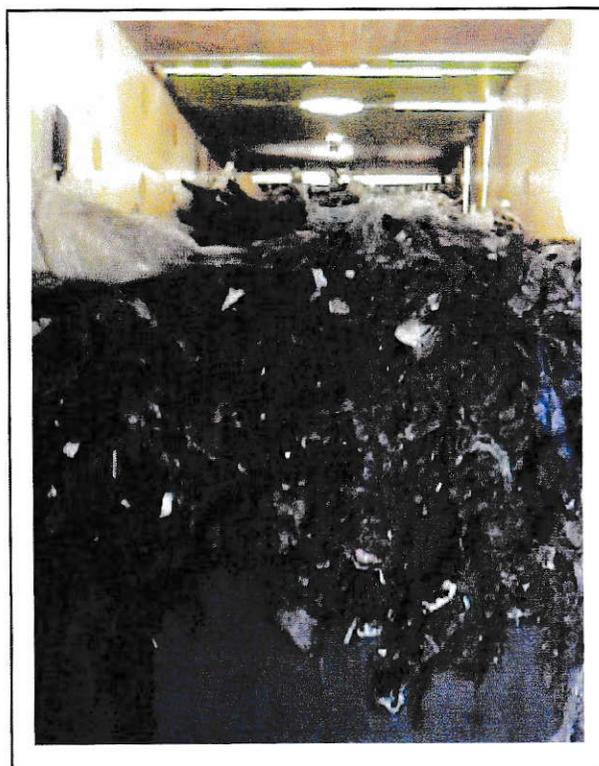


Figura 22. Lugar de muestreo de Alimentación CSSg al Horno 1, banda dosificadora 454-BP1.

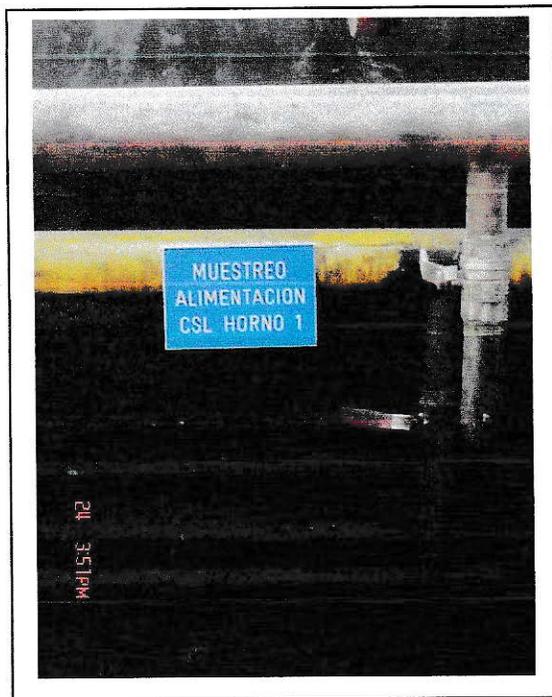


Figura 23. Lugar de muestreo de Alimentación CSL al Horno1.



Figura 24. Lugar de muestreo de alimentación flotación poroso.

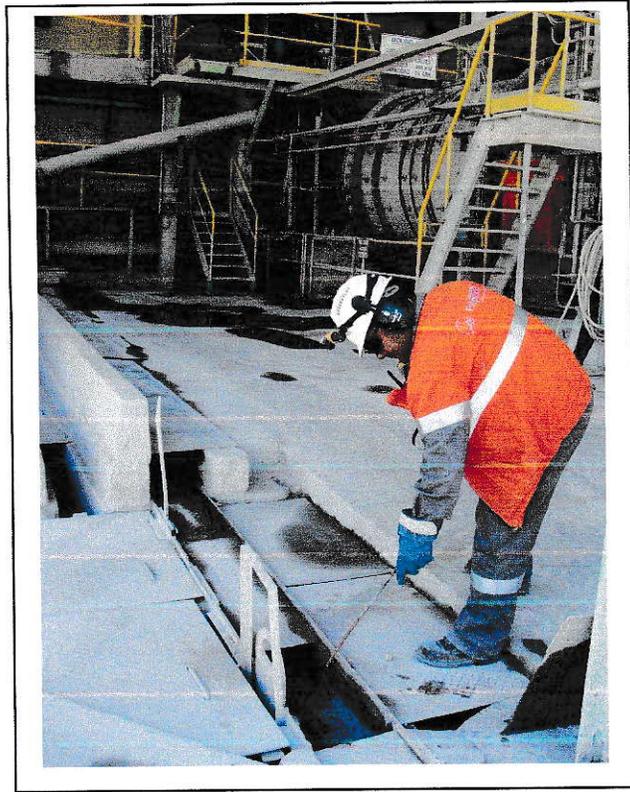


Figura 25. Lugar de muestreo de alimentación flotación caliza.



Figura 26. Lugar de muestreo de concentrado flotación poroso.



Figura 27. Lugar de muestreo de concentrado flotación caliza.

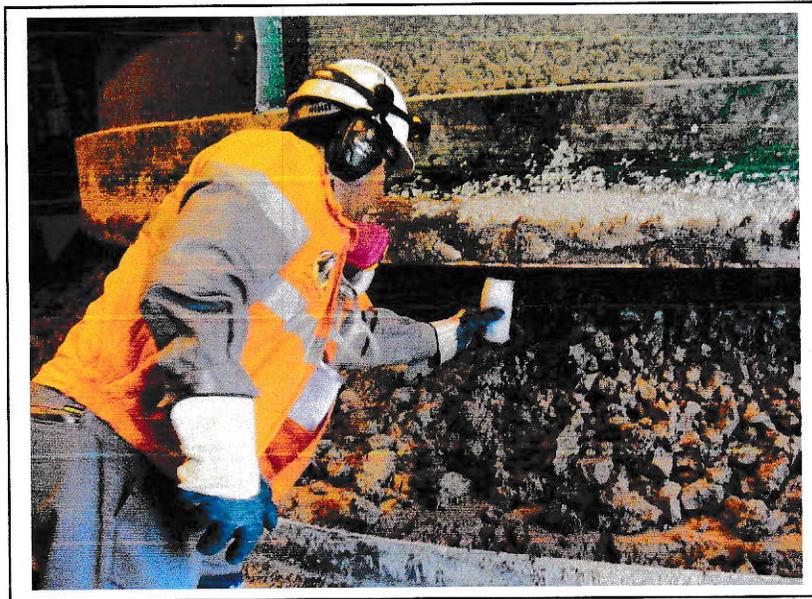


Figura 28. Lugar de muestreo de Alimentación de Crudo al Horno 1, tolva 414-TL2.

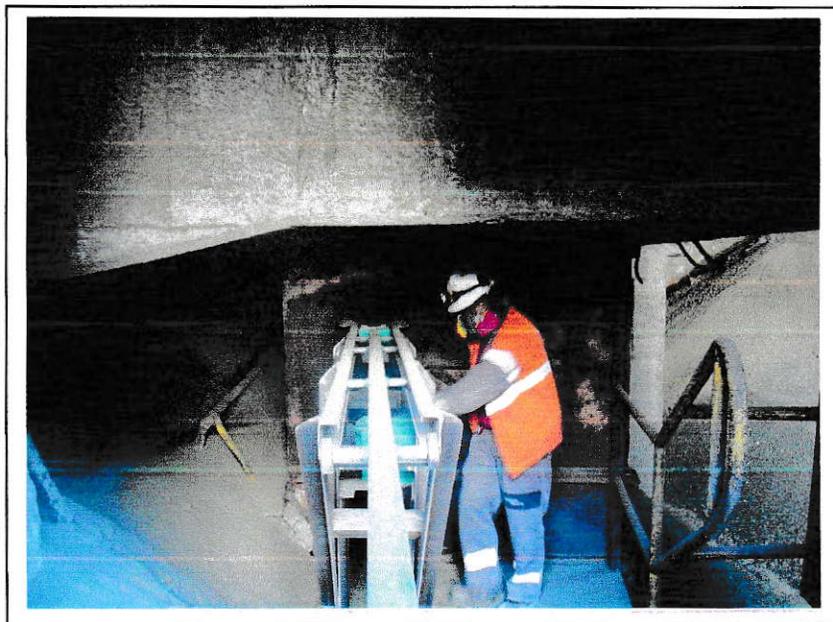


Figura 29. Lugar de muestreo Clinker Horno 1, muestreador 481-TP1.

2.3 Programa de Pruebas en Horno 1

Durante el periodo comprendido entre los días 24 al 28 de Septiembre de 2010 se realizó el programa de las pruebas realizadas en el Horno 1, tal como se indica en la Tabla 18.

Tabla 18. Descripción de Datos Operacionales durante el desarrollo del Programa de Pruebas en el Horno 1.

Prueba	Fecha	Inicio	Término	Crudo (T/h)	Petcoke (T/h)	CSL (T/h)	CSSf (T/h)	CSSg (T/h)
1	24/09/2010	15:41	17:48	152	6,61	0	1,98	0
		17:49	19:08	152	6,8	0	1,49	0
2	27/09/2010	8:00	10:30	154	7,29	0,39	0	0
		10:31	17:30	153	6,92	0,81	0	0
3	28/09/2010	8:00	10:14	153	7,62	0	0	0,41
		10:15	12:41	153	7,69	0	0	0,61
4	28/09/2010	13:00	15:37	154	7,87	0	0	0
		15:38	18:13	146	7,31	0	0	0
		18:14	19:13	154	7,86	0	0	0

Se realizarán 4 pruebas en el Horno 1, cada una de estas pruebas duró aproximadamente 3 horas, consisten en mantener constante la alimentación de crudo y variar la alimentación de petcoke y uno de los 3 AF (Alternative Fuel) utilizados en la fabricación de clinker.

- **Prueba 1:** Variación de la Alimentación de CSSf y Petcoke, manteniendo constante la Alimentación de Crudo.
- **Prueba 2:** Variación de la Alimentación de CSL y Petcoke, manteniendo constante la Alimentación de Crudo.
- **Prueba 3:** Variación de la Alimentación de CSSg y Petcoke, manteniendo constante la Alimentación de Crudo.
- **Prueba 4:** Variación de la Alimentación de Crudo y Petcoke.

Es importante destacar que en la Prueba 4 no se puede mantener fija la alimentación de crudo variando la alimentación de Petcoke, ya que se debe mantener el consumo térmico del horno.

El diseño de las pruebas se realizó utilizando la planilla Excel "Simulación Mix Comb E1", que simula la mezcla de combustibles que es necesaria para producir el clinker. Para realizar los cálculos de la planilla Excel se consideraron los datos indicados en la Tabla 19 (poder calorífico inferior PCI y porcentaje de cloro), además se consideró un factor crudo/clinker de 1,91.

Tabla 19. Análisis de PCI y Cloro para Combustible Tradicional y Alternativos.

Fecha Análisis	Combustible	PCI (Kcal/Kg)	Cloro (%)
10-03-2010	CSL	9137	0,05
22-02-2010	CSSg	4037	0,42
26-02-2010	CSSf	3725	0,10
24-02-2010	Petcoke	8314	0,02

2.4 Monitoreo de Emisiones de COT, Gases y Parámetros del Proceso

De la herramienta de almacenamiento de datos del proceso TIS (Technology Information Support) se obtuvieron los datos de emisiones de COT, flujo de alimentación de crudo, petcoke, CSSg, CSSf y CSL, así como también de algunos gases y parámetros del proceso (CO, oxígeno, temperatura de sinterización)

Se tomaron estos datos con el fin de correlacionar las emisiones de COT con los distintos flujos de alimentación y parámetros del proceso.

2.5 Medición de Gases de Combustión

Paralelamente a las pruebas se midieron algunos gases de combustión (CO, NO_x y O₂) con el fin de establecer la existencia de combustión ideal en cada una de las pruebas.

El analizador de gases de combustión utilizado fue el Equipo Testo 340 (Figura 30). Es un equipo portátil que permite medir instantáneamente las condiciones de combustión, la medición se realiza introduciendo una sonda en puntos de medición seleccionados. Los gases de combustión fueron medidos en el tercer y séptimo piso de la torre precalentadora.



Figura 30. Equipo Analizador de Gases de Combustión, Testo 340. (Fuente: Manual de Instrucciones Testo 340)

Los rangos de medición y la exactitud del equipo Testo 340 para los gases medidos se indican en la Tabla 20.

Tabla 20. Rangos de Medición y Exactitudes de Gases de Combustión. (Fuente: Manual de Instrucciones Testo 340)

Parámetro	Rango de Medición	Exactitud	Resolución	Tiempo de Respuesta 90 %
CO	9-500 ppm	± 2 ppm (0-39,9 ppm) ± 5 % lectura (40-500 ppm)	0,1 ppm	< 40 segundos
NO	0-3000 ppm	± 5 ppm (0-99 ppm) ± 5 % lectura (100-1999 ppm) ± 10 % lectura (2000-3000 ppm)	1 ppm	< 30 segundos
NO ₂	0-500 ppm	± 10 ppm (0-199 ppm) ± 5 ppm resto del rango	0,1 ppm	< 40 segundos
O ₂	0-25 % volumen	$\pm 0,2$ % volumen	0,01 % volumen	< 20 segundos

2.6 Elaboración de Modelo para Balance de Masa de COT

En una primera instancia se definieron los límites de batería del sistema, siendo estos el proceso de fabricación de clinker, el cual parte en la alimentación de crudo y combustibles, finalizando en la salida de clinker en la cancha y las emisiones de COT por la chimenea del Horno 1.

En la Figura 42 disponible en Anexos, se aprecia el plano de ubicación de la chimenea del horno 1; mientras que en la Figura 31 se aprecia un esquema representativo de los límites de batería del sistema.

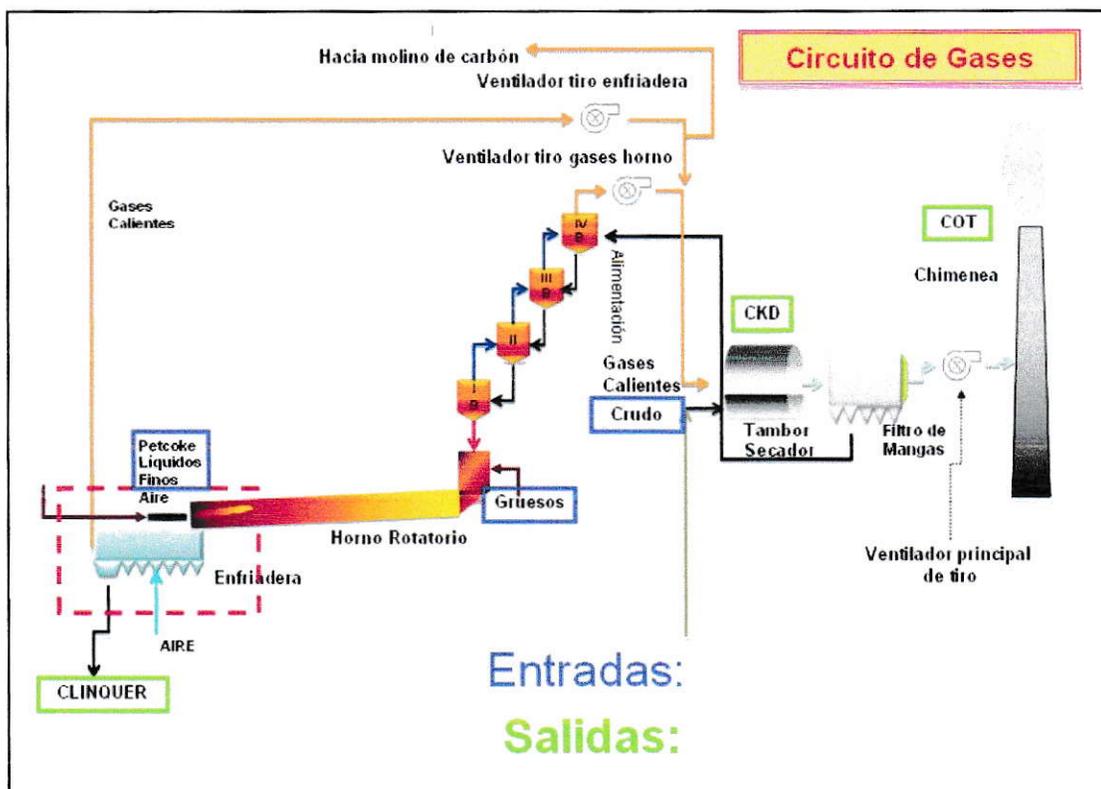


Figura 31. Límites de Batería para Modelo de Balance de Masa de COT.

Luego se definieron cuales serían las entradas y salidas del sistema, para posteriormente definir el modelo de balance de masa de COT.

Siendo las entradas, salidas y modelo de balance de masa de COT los siguientes:

Entradas:

- Alimentación de Crudo
- Alimentación de Petcoke
- Alimentación de CSSg
- Alimentación de CSSf
- Alimentación de CSL

Salidas:

- Clinker
- Emisiones de COT

Modelo de Balance de Masa de COT:

$$F_e - F_s = X_d - X_f \quad (4)$$

Donde :

F_e = Flujos de Entrada de COT (T/h)

F_s = Flujos de Salida de COT (T/h)

X_d = Reacciones Químicas de Formación

X_f = Reacciones Químicas de Destrucción

III RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Análisis Cromatográfico de Acido Graso

El 15 de Diciembre de 2009 se analizó la muestra de ácido graso utilizado en el proceso de flotación. En la Figura 32 se muestra el perfil cromatografico del ácido graso.

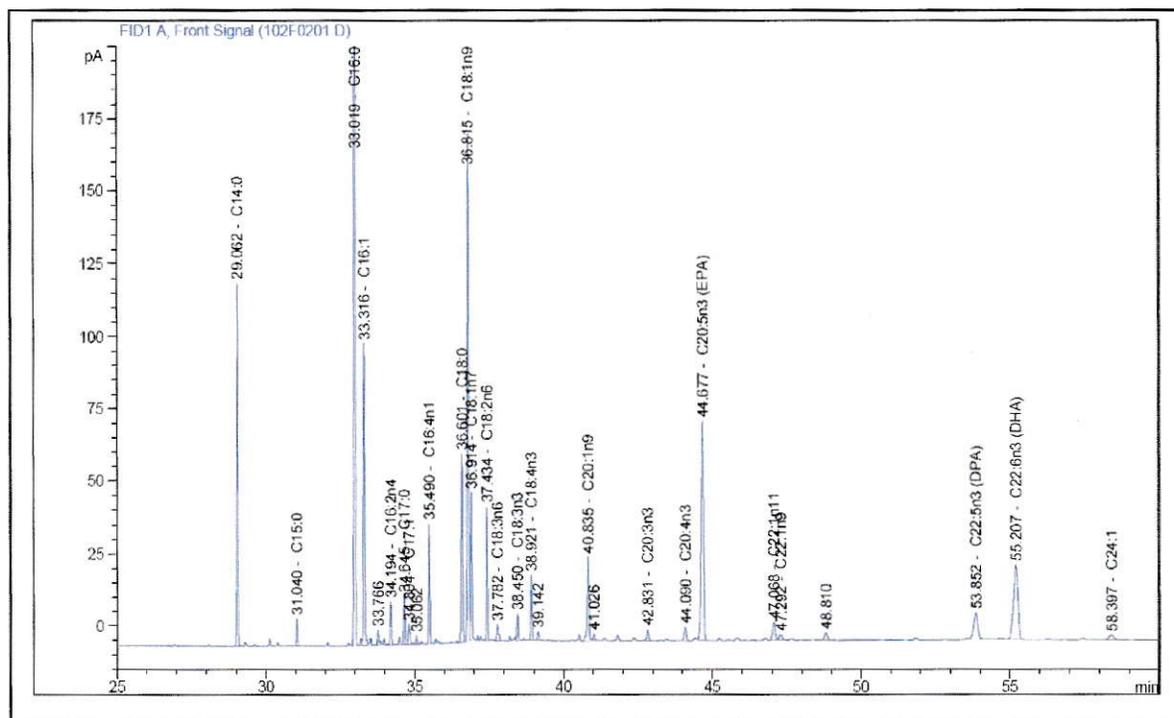


Figura 32. Perfil de Acido Graso, Método de Cromatografía de Gas Capilar con Detector FID.

En este perfil cromatografico se observa que existe una gran variedad de ácidos grasos, dentro de los cuales se destacan: 5 ácidos grasos saturados, 8 ácidos grasos monoinsaturados y 11 ácidos grasos poliinsaturados. En la Tabla 21 se aprecia el % en concentración de estos 3 tipos de ácidos grasos.

Tabla 21. Concentración de Tipos de Acidos Grasos.

Tipo Acido Graso	Nomenclatura Acido Graso	Nombre Acido Graso	Concentración (%)	Total (%)
Saturados	C14:0	Mirístico	8,37	36,8
	C15:0	Pentadecanoico	0,59	
	C16:0	Palmitico	21,9	
	C17:0	Heptadecanoico	1,11	
	C18:0	Esteárico	4,77	
Monoinsaturados	C16:1	Palmitoleico	7,32	30,1
	C17:1	cis-10-Heptadecenoico	0,72	
	C18:1n9(c+t)	Oleico + Elaídico	13,6	
	C18:1n7	cis-11-Octadecanoico	3,33	
	C20:1n9	cis-11-Eicosenoico	3,18	
	C22:1n11	Cis-13-Docosenoico	1,07	
	C22:1n9	Erúcido	0,40	
C24:1n9	Nervónico	0,56		
Poliinsaturados	C16:2n4	cis-9,12-Hexadecadienoico	1,04	31,4
	C16:4n1	cis-6,9,12,15-Hexadecatetraenoico	2,69	
	C18:2n6(c+t)	Linoléico + Linoleaídico	3,15	
	C18:3n6	γ -Linolénico	0,62	
	C18:3n3	α -Linolénico	0,78	
	C18:4n3	cis-6,9,12,15-Octadecatetraenoico	1,84	
	C20:3n3	cis-11,14,17-Eicosatrienoico	0,53	
	C20:4n3	cis-8,11,14,17-Eicosatetraenoico	0,65	
	C20:5n3	cis-5,8,11,14,17-Eicosapentanoico (EPA)	11,1	
	C22:5n3	cis-7,10,13,16,19-Docosapentaenoico (DPA)	2,25	
	C22:6n3	cis-4,7,10,13,16,19-Docosahexanoico (DHA)	6,76	

Al observar la Tabla 21 podemos decir que los tres tipos de ácidos están presentes en cantidades proporcionales, sumando una concentración total de 98,3 %. Se destaca la abundancia en concentración del ácido saturado palmitico (21,9 %), ácido monoinsaturado oleico + elaídico (13,6 %) y el ácido poliinsaturado cis-5,8,11,14,17-eicosapentanoico o EPA (11,1 %).

3.1.2 Análisis COT Combustibles y Materias primas

El 20 de Octubre de 2010 se analizaron las muestras de combustibles y materias primas utilizados en la fabricación de clinker (petcoke, CSSg, CSSf, CSL, crudo y clinker) y en la flotación (alimentación flotación caliza y poroso, y concentrado flotación caliza y poroso). En la Tabla 22 y Tabla 23 se muestran los resultados del contenido de carbono orgánico total en las muestras de combustibles y materias primas, respectivamente.

Tabla 22. Análisis de Contenido Orgánico en Muestras de Combustibles.

Combustible	COT (%)	Humedad Total (%)	Densidad Aparente (Kg/m ³)
Petcoke	0,09	0,4	0,5
CSSg	37,73	9,9	0,2
CSSf	22,04	23,4	0,4

Tabla 23. Análisis de Contenido Orgánico en Muestras de Materias Primas.

Materias Primas	COT (%)	Humedad Total (%)	Densidad Aparente (Kg/m ³)
Alimentación Flotación Poroso	0,43	72	1,2
Concentrado Flotación Poroso	0,31	81	1,7
Alimentación Flotación Caliza	0,36	49	1,5
Concentrado Flotación Caliza	0,26	47	1,6
Crudo	0,19	14,9	1,2
Clinker	<0,01*	0,5	1,4

*Resultado inferior a límite de detección del equipo LECO CS-300. LD=0,01 %.

3.1.3 Análisis Elemental de Combustibles

El 02 de Junio de 2010 se analizaron las muestras de combustibles utilizados en la fabricación de clinker (petcoke, CSSg, CSSf y CSL). En la Tabla 24 y Tabla 25 se muestran los resultados del análisis elemental de estos combustibles en base natural y seca, respectivamente.

Tabla 24. Análisis Elemental de Combustibles (petcoke, CSSg, CSSf y CSL), en base natural.

Combustible	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cenizas (%)	Humedad Total (%)	Humedad Residual (%)
Petcoke	37,87	7,35	45,59	0,82	1,88	8,18	25	3,7
CSSg	91,85	4,06	<0,3*	2,02	1,74	0,93	0,56	0,56
CSSf	79,61	12,97	6,63	<0,01*	0,47	0,326	0,34	-
CSL	43,85	7,16	29	0,81	0,53	18,65	10,79	2,81

* Resultados inferiores al límite de detección del equipo.

Tabla 25. Análisis Elemental de Combustibles (petcoke, CSSg, CSSf y CSL), en base seca.

Combustible	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cenizas (%)
Petcoke	50,59	6,06	31,07	1,09	0,252	10,93
CSSg	92,37	4,02	<0,3*	2,03	1,75	0,93
CSL	49,16	6,67	21,8	0,9	0,59	20,9

* Resultados inferiores al límite de detección del equipo.

3.1.4 Monitoreo Emisiones de COT

Entre el 24 y 28 de Septiembre de 2010 se desarrollaron las 4 pruebas en el Horno 1 de Cemento Polpaico S.A.

En la Figura 33 se aprecia el comportamiento de las emisiones de COT durante el desarrollo de la Prueba 1, en donde se mantiene la alimentación de Crudo constante y se varía la alimentación de los combustibles petcoke y CSSf

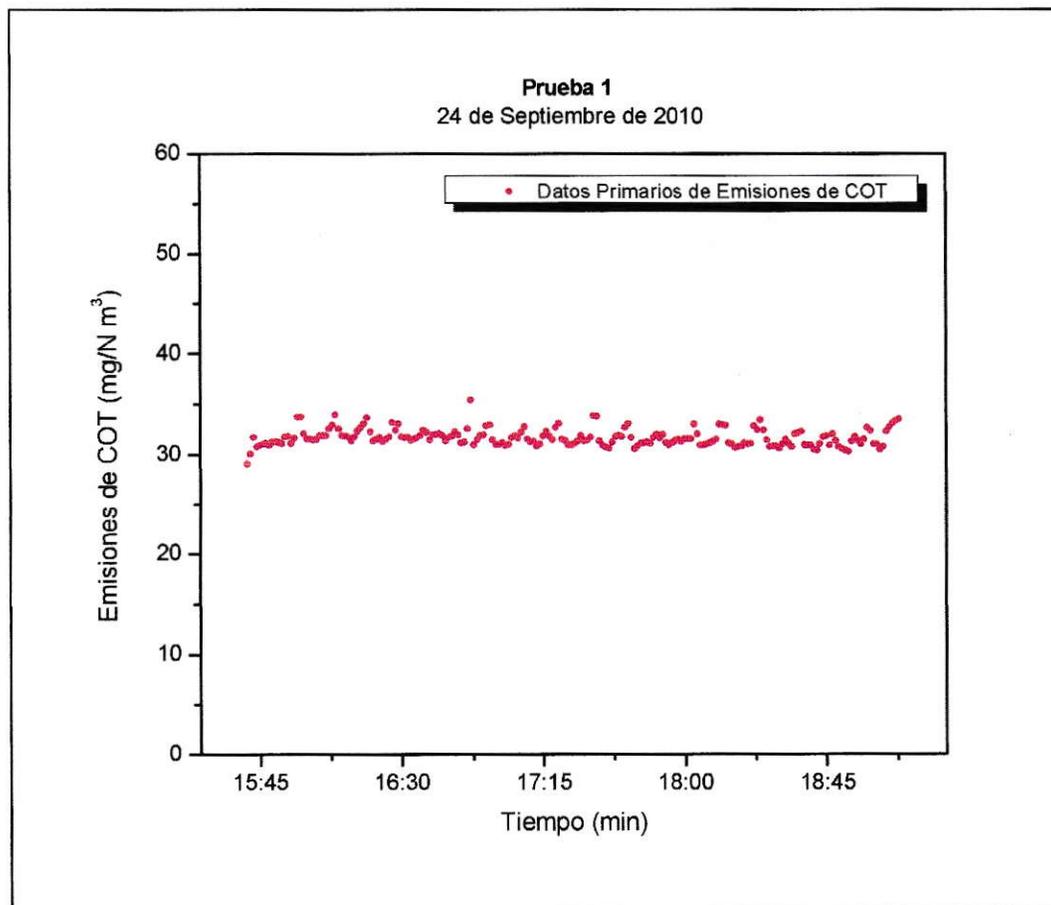


Figura 33. Comportamiento de Emisiones de COT en Chimenea del Horno 1 durante ejecución de la Prueba 1.

De un total de 208 datos primarios de emisiones de COT se obtuvieron los datos estadísticos indicados en la Tabla 26.

Tabla 26. Parámetros Estadísticos de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 1.

Parámetro Estadístico	Valor
Promedio	31,7
Desviación Estándar	0,84
Error	0,06
Percentil 95	33,2
Mínimo	29,1
Máximo	35,5
Mediana	31,5
Varianza	0,7
Coefficiente de Variación	0,03

En la Figura 34 se aprecia el comportamiento de las emisiones de COT durante el desarrollo de la Prueba 2, en donde se mantiene la alimentación de Crudo relativamente constante y se varía la alimentación de los combustibles petcoke y CSL.

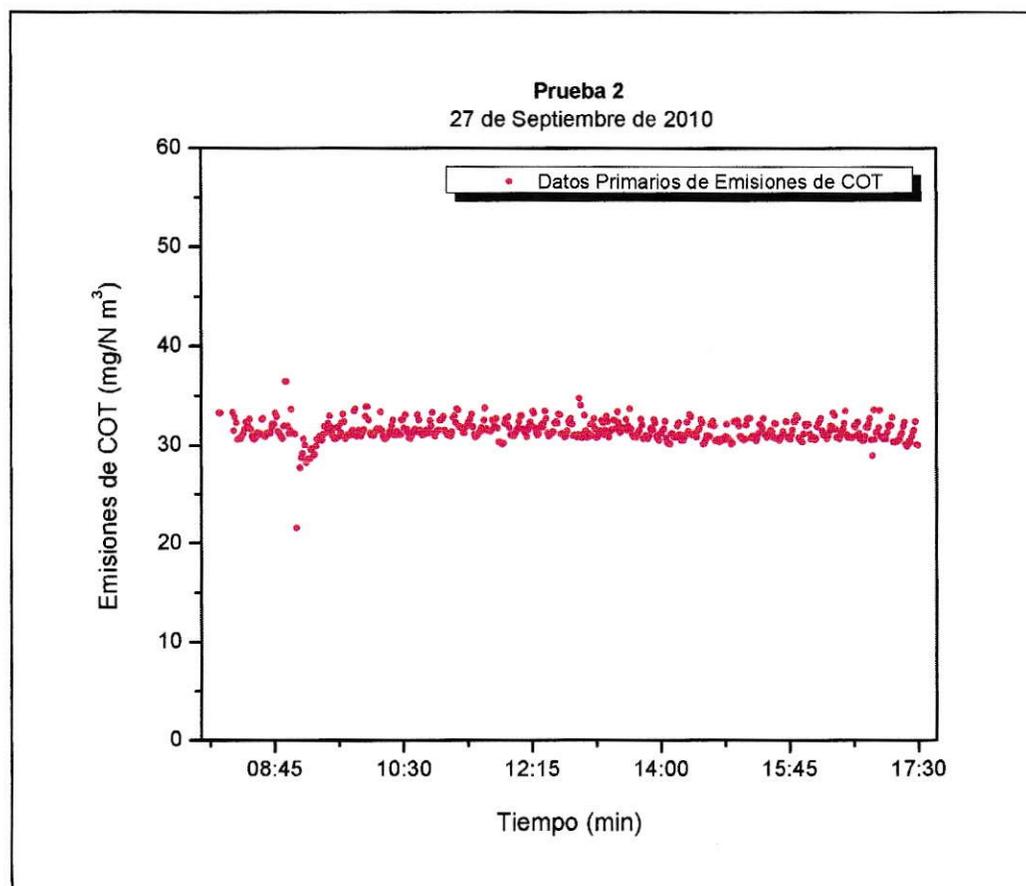


Figura 34. Comportamiento de Emisiones de COT en Chimenea del Horno 1 durante ejecución de la Prueba 2.

Cabe destacar que del total de 571 datos primarios de emisiones de COT, se han eliminado 11 datos, ya estos estaban fuera de escala debido a calibraciones automáticas del equipo de monitoreo continuo. Los datos eliminados se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Datos Eliminados de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 2.

Tiempo	Valor Eliminado
08:02	13,6
08:03	63,5
08:04	67,9
08:05	68,0
08:06	68,0
08:07	68,0
08:08	68,0
08:09	68,0
08:10	68,0
09:04	11,1
09:05	13,9

De un total de 560 datos primarios de emisiones de COT se obtuvieron los datos estadísticos indicados en la Tabla 28.

Tabla 28. Parámetros Estadísticos de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 2.

Parámetro Estadístico	Valor
Promedio	31,4
Desviación Estándar	1,05
Error	0,04
Percentil 95	33,1
Mínimo	21,5
Máximo	36,5
Mediana	31,3
Varianza	1,11
Coefficiente de Variación	0,03

En la Figura 35 se aprecia el comportamiento de las emisiones de COT durante el desarrollo de la Prueba 3, en donde se mantiene la alimentación de Crudo constante y se varía la alimentación de los combustibles petcoke y CSSg.

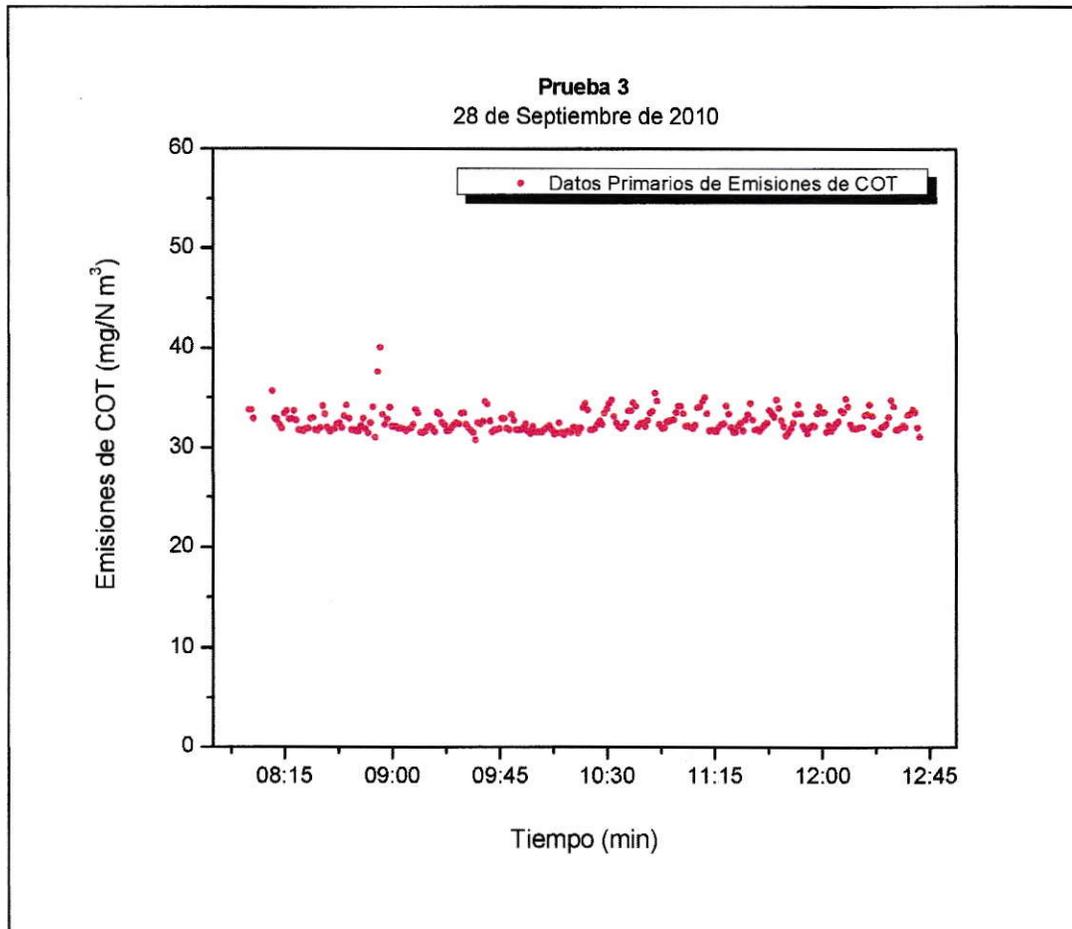


Figura 35. Comportamiento de Emisiones de COT en Chimenea del Horno 1 durante ejecución de la Prueba 3.

Cabe destacar que del total de 282 datos primarios de emisiones de COT, se han eliminado 7 datos, ya estos estaban fuera de escala debido a: calibraciones automáticas del equipo de monitoreo continuo y a pérdida de datos. Los datos eliminados se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29. Datos Eliminados de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 3.

Tiempo	Valor Eliminado
08:03	58,1
08:04	68,0
08:05	-
08:06	-
08:07	-
08:08	-
08:09	-

De un total de 275 datos primarios de emisiones de COT se obtuvieron los datos estadísticos indicados en la Tabla 30.

Tabla 30. Parámetros Estadísticos de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 3.

Parámetro Estadístico	Valor
Promedio	32,6
Desviación Estándar	1,1
Error	0,07
Percentil 95	34,4
Mínimo	30,7
Máximo	40,0
Mediana	32,2
Varianza	1,2
Coficiente de Variación	0,03

En la Figura 36 se aprecia el comportamiento de las emisiones de COT durante el desarrollo de la Prueba 4, en donde se varía la alimentación de crudo y del combustible petcoke.

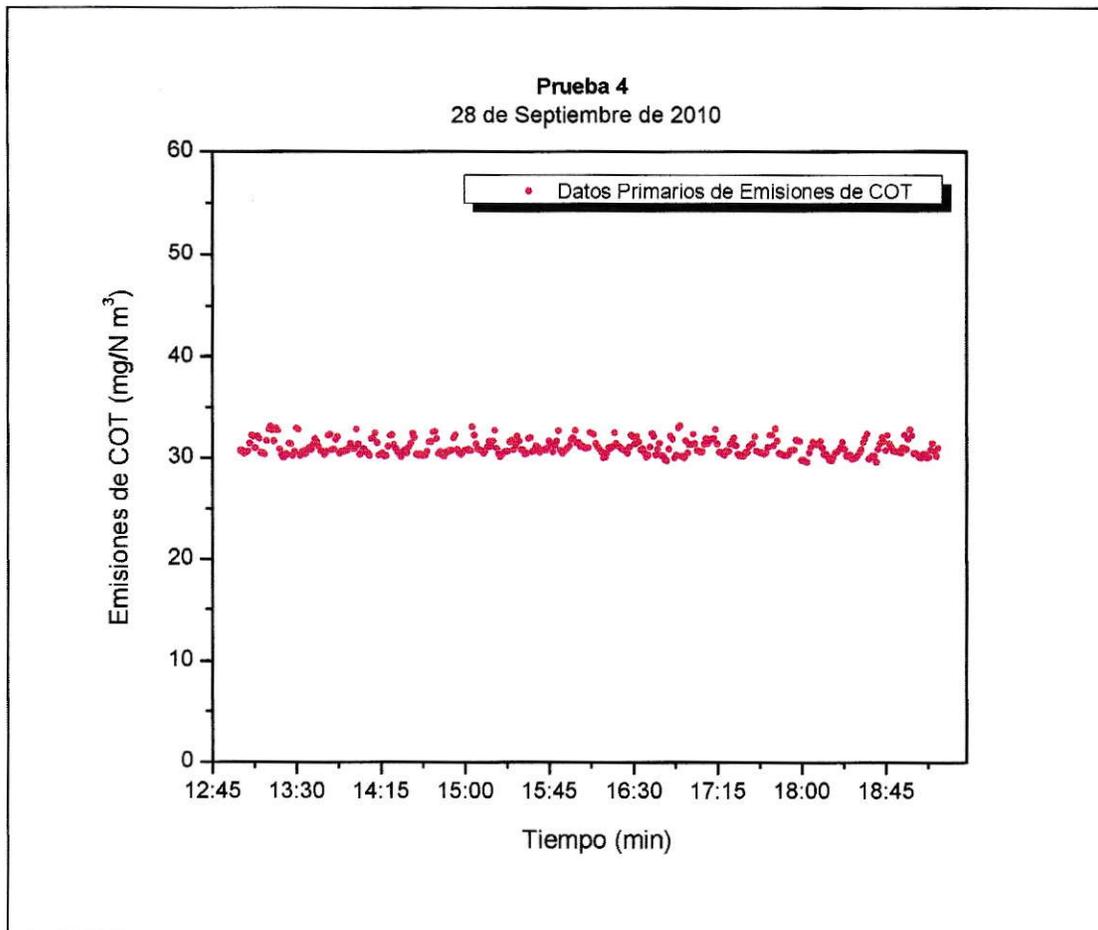


Figura 36. Comportamiento de Emisiones de COT en Chimenea del Horno 1 durante ejecución de la Prueba 4.

De un total de 374 datos primarios de emisiones de COT se obtuvieron los datos estadísticos indicados en la Tabla 31.

Tabla 31. Parámetros Estadísticos de Emisiones de COT durante ejecución de Prueba 4.

Parámetro Estadístico	Valor
Promedio	31,0
Desviación Estándar	0,77
Error	0,04
Percentil 95	32,5
Mínimo	29,6
Máximo	33,1
Mediana	30,8
Varianza	0,6
Coficiente de Variación	0,02

En síntesis, las emisiones de COT de la chimenea del Horno 1 de Cemento Polpaico a las condiciones de realización de las pruebas se mantienen constantes en $31,7 \text{ mg/N m}^3$, tal como se muestra en la Figura 37.

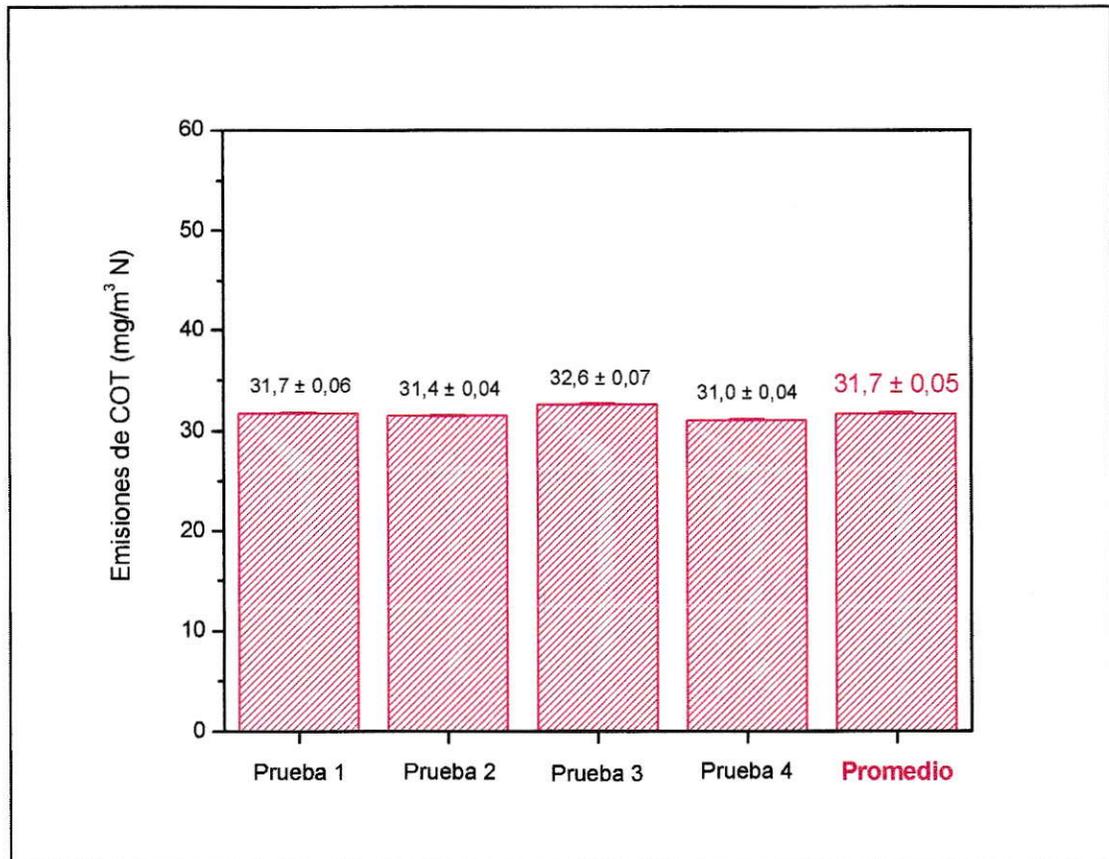


Figura 37. Resumen de las Emisiones de COT durante ejecución de Pruebas en Horno 1.

3.1.5 Correlación de Emisiones de COT

Adicionalmente al monitoreo de las emisiones de COT en las 4 pruebas se monitorearon algunos parámetros (alimentación de crudo, alimentación de combustible tradicional y alternativos, emisión de CO, emisión de NO, temperatura de sinterización y niveles de oxígeno), los cuales se correlacionaron con las emisiones de COT.

En la Figura 38 podemos apreciar la correlación que existe entre las emisiones de COT y los parámetros de referencia en la prueba 1.

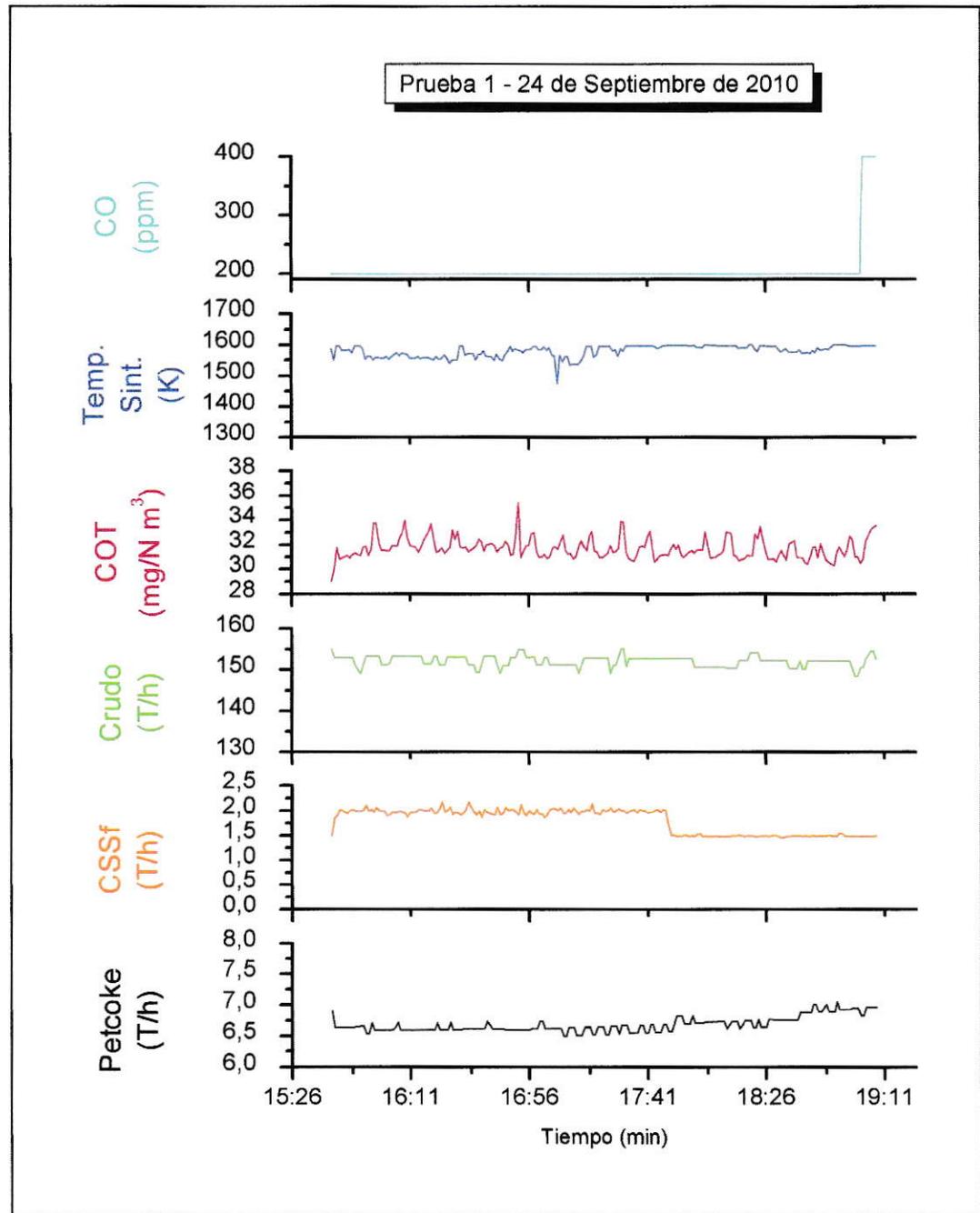


Figura 38. Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de la Prueba 1.

De un total de 208 datos primarios para los parámetros de referencia se obtuvieron los datos estadísticos indicados en la Tabla 32.

Tabla 32. Parámetros Estadísticos de Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 1.

Parámetro Estadístico	Valor Petcoke	Valor CSSf	Valor Crudo	Valor Temperatura Sinterización	Valor CO
Promedio	6,68	1,79	152,2	1579,8	205,8
Desviación Estándar	0,12	0,24	1,28	18,6	33,6
Error	0,01	0,02	0,09	1,29	2,33
Percentil 95	6,95	2,05	154,2	1598,5	200
Mínimo	6,5	1,45	148,5	1475,8	200
Máximo	7,05	2,16	155,1	1599,2	400
Mediana	6,64	1,94	152,3	1584,5	200
Varianza	0,02	0,06	1,64	345,7	1126
Coefficiente de Variación	0,02	0,14	0,01	0,01	0,16

Además en esta Tabla 33 se indica el coeficiente de correlación existente entre las emisiones de COT y los parámetros de referencia.

Tabla 33. Valor de Coeficiente de Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 1.

	Valor Coeficiente Correlación
Petcoke	2,8E-2
CSSf	2,9E-2
Crudo	3,4E-2
Temperatura Sinterización	2,8E-2
CO	4,0E-2

En la Figura 39 podemos apreciar la correlación que existe entre las emisiones de COT y los parámetros de referencia en la prueba 2.

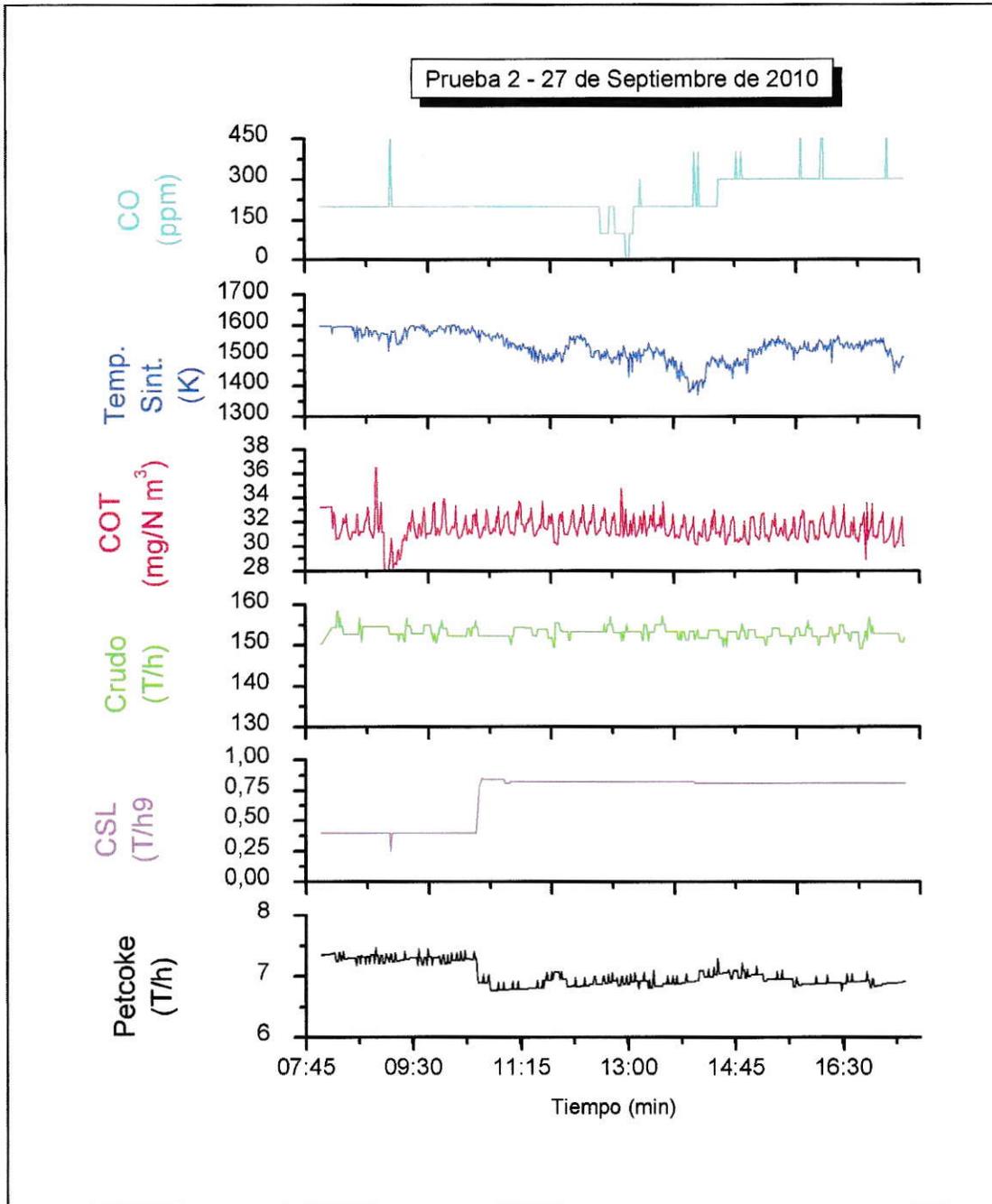


Figura 39. Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de la Prueba 2.

De un total de 560 datos primarios para los parámetros de referencia se obtuvieron los datos estadísticos indicados en la Tabla 34.

Tabla 34. Parámetros Estadísticos de Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 2.

Parámetro Estadístico	Valor Petcoke	Valor CSL	Valor Crudo	Valor Temperatura Sinterización	Valor CO
Promedio	7,01	0,71	153,1	1528,6	230,9
Desviación Estándar	0,18	0,18	1,32	46,5	65,7
Error	0,01	0,01	0,06	1,96	2,78
Percentil 95	7,34	0,82	155,1	1595,9	300
Mínimo	6,76	0,25	149,2	1373	0
Máximo	7,47	0,85	158,5	1599,2	700
Mediana	6,94	0,81	153,2	1530,9	200
Varianza	0,03	0,03	1,74	2160,2	4321,2
Coefficiente de Variación	0,03	0,26	0,01	0,03	0,28

Además en la Tabla 35 se indica el coeficiente de correlación existente entre las emisiones de COT y los parámetros de referencia.

Tabla 35. Valor de Coeficiente de Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 2.

	Valor Coeficiente Correlación
Petcoke	9,0E-3
CSL	4,8E-3
Crudo	3,9E-3
Temperatura Sinterización	5,1E-3
CO	1,1E-2

En la Figura 40 podemos apreciar la correlación que existe entre las emisiones de COT y los parámetros de referencia en la prueba 3.

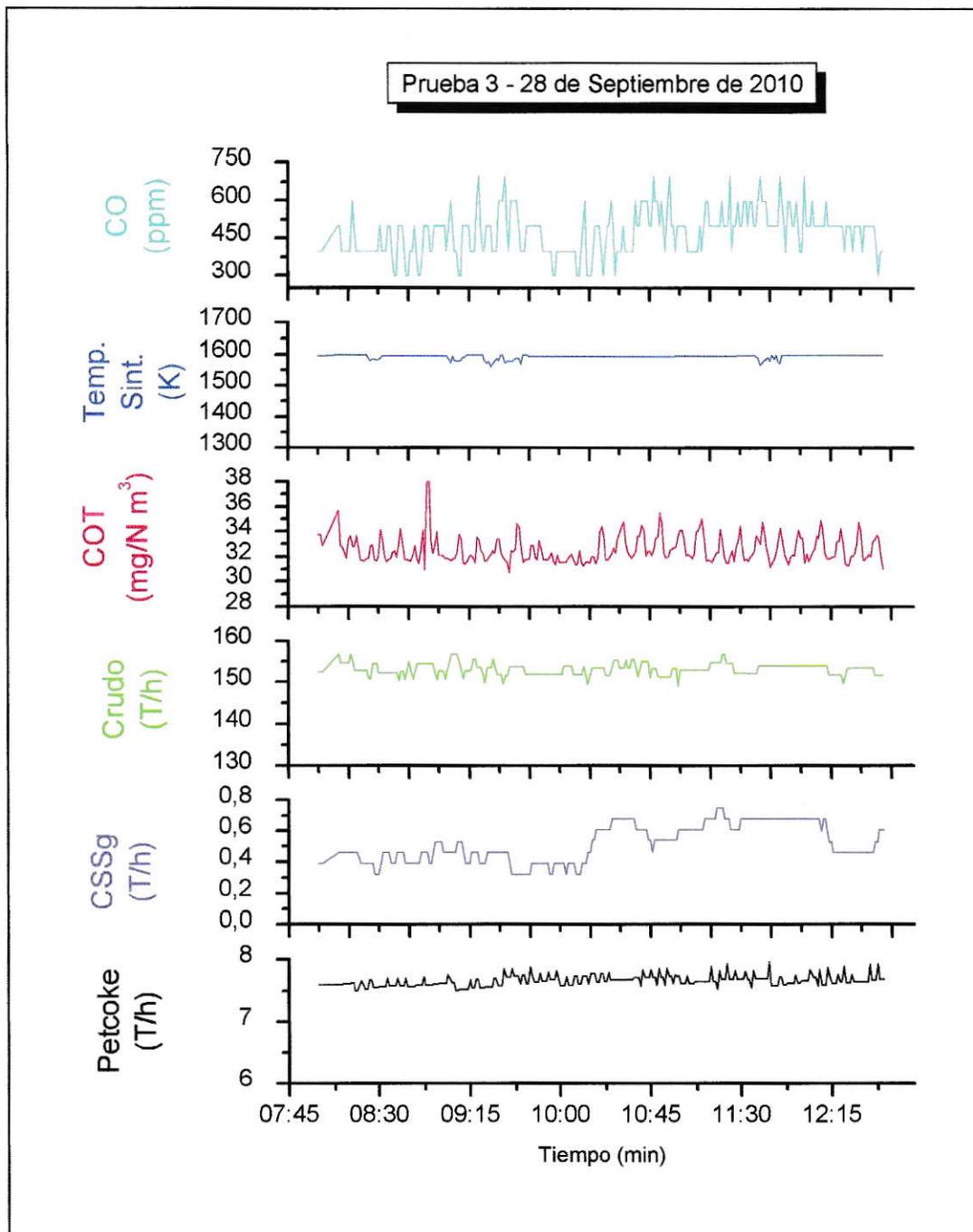


Figura 40. Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de la Prueba 3.

De un total de 275 datos primarios para los parámetros de referencia se obtuvieron los datos estadísticos indicados en la Tabla 36.

Tabla 36. Parámetros Estadísticos de Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 3.

Parámetro Estadístico	Valor Petcoke	Valor CSSg	Valor Crudo	Valor Temperatura Sinterización	Valor CO
Promedio	7,66	0,52	153,1	1593,9	473,5
Desviación Estándar	0,09	0,12	1,39	6,31	88,7
Error	0,01	0,01	0,08	0,38	5,35
Percentil 95	7,84	0,68	155,4	1598,7	600
Mínimo	7,51	0,32	149,6	1562,7	300
Máximo	7,96	0,75	156,8	1599,2	700
Mediana	7,65	0,46	153,3	1596,2	500
Varianza	0,01	0,01	1,94	39,8	7869,4
Coefficiente de Variación	0,01	0,23	0,01	0,00	0,19

Además en esta Tabla 37 se indica el coeficiente de correlación existente entre las emisiones de COT y los parámetros de referencia.

Tabla 37. Valor de Coeficiente de Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 3.

	Valor Coeficiente Correlación
Petcoke	1,0E-3
CSSf	2,7E-2
Crudo	1,0E-2
Temperatura Sinterización	8,5E-5
CO	2,3E-2

En la Figura 41 podemos apreciar la correlación que existe entre las emisiones de COT y los parámetros de referencia en la prueba 4.

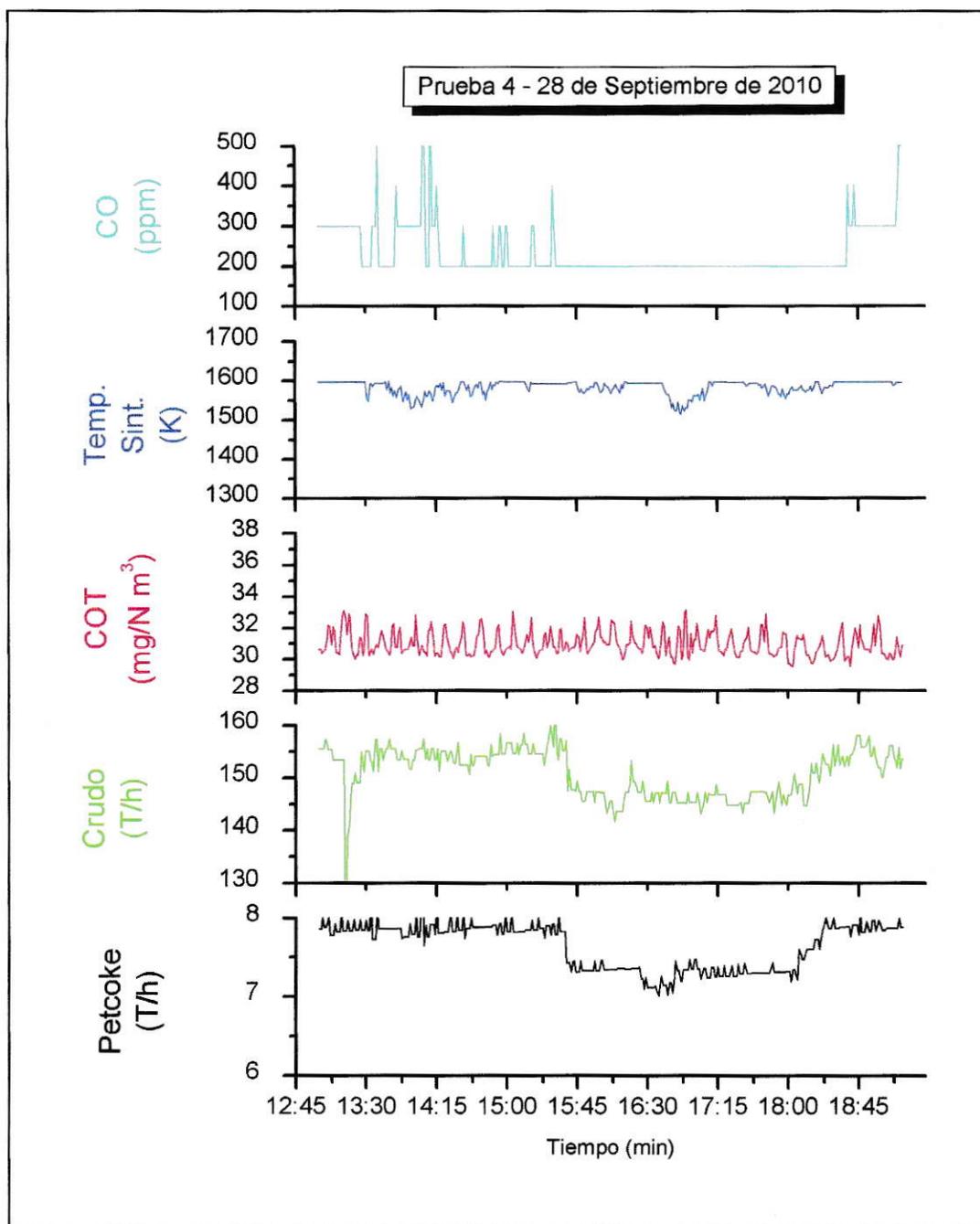


Figura 41. Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de la Prueba 4.

De un total de 374 datos primarios para los parámetros de referencia se obtuvieron los datos estadísticos indicados en la Tabla 38.

Tabla 38. Parámetros Estadísticos de Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 4.

Parámetro Estadístico	Valor Petcoke	Valor Crudo	Valor Temperatura Sinterización	Valor CO
Promedio	7,64	150,8	1584,5	232,6
Desviación Estándar	0,29	4,79	17,5	62,2
Error	0,02	0,25	0,9	3,22
Percentil 95	8,0	157	1598,3	300
Mínimo	7,01	114,7	1516,4	200
Máximo	8,57	163,5	1599	700
Mediana	7,79	152,3	1593,4	200
Varianza	0,09	22,9	305,1	3866
Coficiente de Variación	0,04	0,03	0,01	0,27

Además en esta Tabla 39 se indica el coeficiente de correlación existente entre las emisiones de COT y los parámetros de referencia.

Tabla 39. Valor de Coeficiente de Correlación de Emisiones de COT con Parámetros del Proceso durante ejecución de Prueba 4.

	Valor Coeficiente Correlación
Petcoke	3,9E-4
Crudo	5,9E-3
Temperatura Sinterización	1,9E-3
CO	8,5E-7

3.1.6 Medición de Gases de Combustión

Los resultados de las mediciones de flujo de gases, oxígeno, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno, realizadas tanto en el tercer como el séptimo piso de la torre precalentadora se indican en la Tabla 40.

Tabla 40. Resultados de Mediciones de Gases de Combustión en Tercer y Séptimo Piso de Torre Precaentadora.

Prueba	Punto Medición Tercer Piso Torre Precaentadora				Punto Medición Séptimo Piso Torre Precaentadora			
	Flujo	CO	NOx	O2	Flujo	CO	NOx	O2
1	0,6	67,0	2214,0	5,6	0,6	185,5	1928,5	4,5
	0,6	5,0	1091,0	3,5	0,6	194,5	1927,0	4,2
2	0,6	30,0	1263,0	3,4	0,6	185,0	1641,5	4,6
	0,6	5,7	911,7	5,3	0,5	171,5	1258,0	4,9
3	0,6	16,0	1291,5	4,3	0,6	363,0	1848,0	4,7
	0,6	71,5	1301,5	4,6	0,6	535,5	1314,5	4,5
4	0,6	39,5	1365,0	4,3	0,6	253,0	1486,5	4,1
	0,6	3,5	1151,5	4,0	0,6	157,0	1473,5	5,5

Considerando que el flujo de gases es constante podemos decir que los valores promedios de las mediciones realizadas son los indicados en la Tabla 41.

Tabla 41. Resumen de Mediciones de Gases de Combustión durante ejecución de Prueba 1, 2, 3 y 4.

Prueba	CO (ppm)	NOx (ppm)	O ₂ (%)
1	176,1	1790,1	4,46
2	98,04	1268,5	4,54
3	246,5	1438,9	4,52
4	113,3	1369,1	4,49

3.1.7 Balance de Masa de COT

Teniendo presente el modelo de balance de masa de COT es el indicado en la Ecuación 56, y que las entradas y salidas del sistema son:

- Entradas: Alimentación de Crudo, Petcoke, CSSg, CSSf y CSL
- Salidas: Clinker y Emisiones de COT

Considerando los datos de emisiones de COT indicados en la Tabla 26, Tabla 27, Tabla 28, Tabla 30 y Tabla 31; tenemos el promedio de mg/N m^3 de COT a partir de los datos primarios (cada un minuto) en cada una de las pruebas ejecutadas.

Considerando los datos de parámetros del proceso (Crudo, Petcoke, CSL, CSSg y CSL) indicados en la Tabla 32, Tabla 33, Tabla 34, Tabla 36 y Tabla 38; tenemos el promedio de las toneladas/hora de inyección a partir de los datos primarios (cada un minuto) en cada una de las pruebas ejecutadas.

No obstante, no es posible conocer en forma directa (por medio de equipos de medición de masa) las toneladas/hora de clinker elaborado. La forma indirecta de conocer este flujo es considerando un factor experimental (relación del peso de crudo inyectado en relación al clinker elaborado); este factor es 1,91.

Adicionalmente, a la alimentación de crudo es necesario restar una fracción de material, que proviene de la recirculación de los gases y polvo provenientes del filtro de mangas y que entra al tambor secador. Según balance de materiales realizado el 10 de Diciembre de 2010, la recirculación proveniente del tambor secador es de 0,189 Kg/Kg de alimentación de crudo.

Considerando los resultados de los análisis químicos de COT indicados en la Tabla 22 y Tabla 23, los datos de flujo de entradas y salidas (excepto emisiones de COT); es posible determinar las toneladas/hora de COT presente en cada entrada y salida en cada una de las pruebas ejecutadas.

No obstante como el combustible CSL no fue posible determinar el contenido de COT presente en él, debido a que el equipo Leco no permite analizar muestras

líquidas, se asume el contenido de carbono orgánico total en el combustible CSL igual al contenido de carbono orgánico total presente en el combustible petcoke (0,09 %). Para considerar este supuesto se toman como referencia los datos de análisis elemental de combustibles en base seca, indicados en la Tabla 25.

Para transformar las emisiones de COT en unidades de mg/N m³ en unidades de toneladas horas se considera el promedio del caudal de los gases presentes en la chimenea del Horno 1 durante al ejecución de las pruebas, éstos datos se indican en la Tabla 42.

Tabla 42. Caudal de Gases Promedio durante ejecución de Pruebas 1, 2, 3 y 4.

Prueba	Caudal de Gases (m ³ /s N)
1	69,5
2	72,3
3	68,4
4	68,9

De esta forma se obtienen todas las entradas y salidas de nuestro sistema en unidades de toneladas/horas de COT, los cuales se muestran en la Tabla 43. Los cálculos realizados se pueden observar en el anexo de cálculos

Tabla 43. Flujo Másico de COT en Entradas y Salidas de Modelo de Masa de COT.

Prueba	COT* Crudo (T/h N)	COT* Clinker (T/h N)	COT* Petcoke (T/h N)	COT* CSSg (T/h N)	COT* CSSf (T/h N)	COT* CSL (T/h N)	Emisiones COT (T/h N)
1	0,2346	0,008	0,006	-	0,3944	-	0,0079
2	0,2361	0,008	0,0063	-	-	0,0006	0,0082
3	0,2361	0,008	0,0069	0,1957	-	-	0,008
4	0,2325	0,0079	0,0069	-	-	-	0,0077

Considerando los datos de la tabla anterior y aplicando la ecuación 56, tenemos que el balance de masa en cada una de las pruebas es el siguiente:

$$\text{Prueba 1:} \quad 0,635 - 0,016 = X_d - X_f$$

$$0,619 = X_d - X_f$$

$$0,619 + X_f = X_d$$

$$\text{Prueba 2:} \quad 0,243 - 0,016 = X_d - X_f$$

$$0,227 = X_d - X_f$$

$$0,227 + X_f = X_d$$

$$\text{Prueba 3:} \quad 0,439 - 0,016 = X_d - X_f$$

$$0,423 = X_d - X_f$$

$$0,423 + X_f = X_d$$

$$\text{Prueba 4:} \quad 0,239 - 0,016 = X_d - X_f$$

$$0,223 = X_d - X_f$$

$$0,223 + X_f = X_d$$

3.2 Análisis y Discusión

Los antecedentes disponibles sobre las emisiones de COT en la chimenea de Horno 1 concluyen que la materia prima empleada para la fabricación de clinker contiene una gran carga orgánica, debido principalmente a la adición de agentes en el proceso de flotación para concentrar la caliza de baja calidad. No obstante, este estudio no permite evaluar el aporte y efecto de los combustibles tradicionales y alternativos sobre las emisiones de COT.

Al igual que los resultados de las pruebas de expulsión realizadas por Holcim, se encuentra en el ácido graso empleado en el proceso de flotación una gran abundancia de estructuras orgánicas saturadas, monoinsaturadas y poliinsaturadas. Coincidiendo en ambos casos, independiente de la metodología de análisis empleada, que el ácido graso más abundante es el ácido palmítico.

Al comparar los resultados del contenido orgánico de las muestras de combustibles analizados se aprecia que el combustible tradicional petcoke presenta el menor contenido orgánico en comparación a los combustibles alternativos (CSSg y CSSf). Este resultado era de esperarse, ya que los combustibles alternativos están preparados en base residuos de plásticos, restos de lubricantes, entre otros; que contienen una gran carga orgánica.

Al comparar los resultados del contenido orgánico presente en las materias primas, se ve que tanto para el material poroso presenta un mayor contenido de COT en comparación al material caliza; este resultado es idéntico al presentado en las pruebas de expulsión realizadas por Holcim.

Al adicionar el ácido graso en el proceso de flotación, tanto para el material caliza y poroso se aprecia una disminución del contenido de COT. Estos resultados son contrarios a los indicados en las pruebas de expulsión realizadas por Holcim, en donde se establece que al agregar el ácido graso aumenta el COT en ambos tipos de materiales. Es posible que los resultados estén intercambiados.

La muestra de crudo analizado por Cesmec presenta un COT de 0,19 %, se presenta una diferencia de 0,04 % en comparación al resultado de este material en las pruebas de expulsión realizadas por Holcim.

Además, el material clinker Casi no posee contenido de carbono orgánico (valores por debajo del límite de detección del equipo), esto ratifica el hecho que todo el material orgánico presente por el crudo se estaría liberando como COT por la chimenea del Horno 1.

El comportamiento de las emisiones de COT durante al ejecución de las cuatro pruebas fue estable; siendo el valor mínimo 21,52 mg/N m³, el valor máximo 40,03 mg/N m³ y el promedio de 31,7 mg/N m³.

Se aprecia que a las condiciones de ejecución de las cuatro pruebas no existe correlación entre las emisiones de COT y: alimentación de crudo, alimentación de combustible tradicional y alternativo; así como también de algunos parámetros del proceso: la temperatura de sinterización que da una idea de la estabilidad del Horno y los niveles de CO que da una idea del grado de combustión existente en el Horno. Al realizar las mediciones in situ de las concentraciones de los gases de combustión, nos dan cuenta que en las cuatro pruebas existe una abundancia de oxígeno, por lo tanto si existen condiciones de combustión ideal y no estarían

saliendo por la chimenea del Horno 1 hidrocarburos orgánicos sin quemar desde el combustible tradicional y alternativos.

La prueba 2 sería la con mejores condiciones de combustión ideal, ya que los niveles de CO son los más bajos. No obstante las concentraciones de NOx nos dan cuenta de un ambiente altamente reductor en la chimenea del Horno 1.

Al realizar el balance de masa de COT entre entradas y salidas al sistema, nos damos cuenta que en las cuatro pruebas las reacciones de destrucción son mayores a las reacciones de formación; por lo cual se ratifica el hecho que el Horno 1 es un gran reactor químico que debido a las altas temperaturas alcanzadas se destruyen todos los compuestos orgánicos más letales para el ser humano (por ejemplo dioxinas y furanos), y se transforman en unidades de átomos de carbono más simples como metano, etano, entre otros.

IV CONCLUSIONES

- A las condiciones de ejecución de las pruebas, estadísticamente no se aprecia relación de los combustibles con las emisiones de COT.
- Existen antecedentes que permiten suponer que las emisiones de COT se ven incrementadas con la adición del ácido graso empleado en el proceso de flotación.
- Considerando que la ejecución de las pruebas fue realizada bajo condiciones óptimas de combustión (niveles de oxígeno por sobre el 4 %) y que en todas las pruebas el balance de masa de COT las reacciones de destrucción fueron mayores a las reacciones de formación; se puede avalar que las emisiones de COT provienen de la materia prima.

V RECOMENDACIONES

- Operar el Horno a las condiciones de operación descritas en este estudio, con el fin de manejar las emisiones de COT.
- Buscar metodologías adecuadas para la cuantificación y caracterización de COT.
- Realizar pruebas industriales con distintas dosificaciones de ácido graso, con el fin de evaluar el aporte de este material sobre las emisiones de COT.

VI REFERENCIAS

AIR EMISSION SOURCES. Revisado 28 Julio 2010.

www.epa.gov/air/emissions/basic.htm#data1oc

AIR POLLUTION: VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS. Revisado 25 Julio 2010.

www.environmentalindicators.com/htdocs/indicators/3vola.htm

AIR TOXICS AND INDOOR AIR QUALITY IN AUSTRALIA. Revisado 23 Julio 2010.

www.environment.gov.au/atmosphere/airquality/publications/sok/vocs.html

AIRÓN. 2009. Informe Campaña de Mediciones 2009 Horno 1 Cemento Polpaico S.A.

AOCS. 1997. Official Method Ce ab-89: Fatty Acid Composition by GLC.

CARVALLO L. 2010. Informe Área Geología Cemento Polpaico S.A.: "Descripción del yacimiento mineral, basado en el informe geológico que identifica las especies minerales útiles y el estéril".

CEMENTO POLPAICO S.A. 2004. Manual Integrado de Gestión Operaciones Cemento.

CESMEC. 2010. Metodología Determinación COT.

CESMEC. 2010. Informe de Ensayo SQC-20265.

CONAMA. 2009. Estrategia para la Conservación de la Biodiversidad en la Región Metropolitana de Santiago.

CONAMA. 2009. RCA 365 "Optimización Operacional Co-procesamiento Planta Cerro Blanco".

CONAMA. 2010. Anteproyecto de revisión de la Norma de Emisión para la Incineración y Coincineración.

CONAMA RM. 2002. Suelos Región Metropolitana.

CONSEJO FEDERAL SUIZO. 2010. Ordonnance sur la protection de l'air (OPair).

COREMA RM. 2002. RCA 690: Utilización de Mezcla Carbón-Coque de Petróleo como combustible en Planta Cerro Blanco.

COREMA RM. 2003. RCA 564: Ampliación del Uso de Combustible de Sustitución y Materias Primas Alternativas en Planta Cerro Blanco.

COREMA RM. 2009. RCA 365: Optimización Operacional Co-procesamiento Planta Cerro Blanco.

COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES. Revisado 20 Julio 2010.
http://es.wikipedia.org/wiki/Compuestos_org%C3%A1nicos_vol%C3%A1tiles

COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV). Revisado 4 Agosto 2010.
www.higieneambiental.com/calidad-de-aire-interior/compuestos-organicos-volatiles-cov

Department of Environmental Affairs South Africa. 2008. National Policy on Thermal Treatment of General and Hazardous Waste.

DETECTOR DE IONIZACIÓN DE LLAMA. Revisado 15 Enero 2011.
http://es.wikipedia.org/wiki/Detector_de_ionizaci%C3%B3n_de_llama

DICTUC UNIVERSIDAD CATÓLICA. 2007. Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana 2005.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2004. Diagnóstico y Clasificación de los cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Maipo.

Directiva 2000/76/CE Del Parlamento y del Consejo Europeo. 2000. Incineración de residuos.

FEHSENFELD F. et al. 1992. Emission of Volatile Organic Compounds from Vegetation and the Implications for Atmospheric Chemistry.

FERNALDT C. 2003. ppt Mediciones y Monitoreo C^oB^o.

FICHA COMUNAL. Revisado 5 Junio 2011.
http://www.sinim.gov.cl/ficha_comunal/fcomunal.php?id_muni=13303&ano=2008&periodo=A

FUENTEALBA A. 2002. Propiedades en la Formación del Clinker.

GAMMA Ingenieros. 2007. Diseño y evaluación de las nuevas medidas para fuentes fijas contenidas en el PPDA. Línea de trabajo N° 3: Propuesta para el seguimiento de las Emisiones de MP y NOx en fuentes categorizadas como grandes emisores Industriales.

HIDROCARBUROS. Revisado 10 Junio 2011.
<http://www.textoscientificos.com/quimica/hidrocarburos>

HOLCIM. 2008. Holcim Course on Environment.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. 2009. Directorio Maestro 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. 1968. NCH 148 Of. 68. Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales.

INSTITUTO SALUD PÚBLICA. 2009. Método CH-25A: “Determinación de la Concentración de los Compuestos Orgánicos Volátiles Totales mediante un Analizador de Ionización de Flama”.

ILABACA B. 2010. Optimización del uso de Petcoke como combustible en la Fabricación de Cemento.

ITURRIAGA L. 2011. Curso General en Biodiversidad y Conservación de Humedales en la Región Metropolitana.

LÓPEZ V. 2001. MWFT Básico Química del Clinker y Cemento.

MESIAS S. 2009. Propuesta de Protocolo de Instalación, Operación Y Mantenimiento de Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones Atmosféricas.

METANO. Revisado el 01 Octubre 2011.
<http://es.wikipedia.org/wiki/Metano>

MINISTERIO SECRETARIA GENERAL DE LA PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. 2007. Decreto Supremo 45 "Norma de Incineración y Co-incineración.

MIRANDA Y. y DÁVILA F. 2005. Propuesta de Conservación bajo Estándares de la Convención Ramsar para el Ecosistema Humedal Laguna de Batuco.

MORALES R. 2006. Contaminación Atmosférica Urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago.

National Institute of Standards and Technology. 2003. CRC Handbook of Chemistry and Physics.

PRENDEZ M., Peralta H. 2001. Determinación de Factores de Emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles de dos Especies Arbóreas de la Región Metropolitana, Chile.

PRODUCTOS Y SERVICIOS: CEMENTO. Revisado 25 Enero 2011.
www.holcim.cl

PROVINCIA DE CHACABUCO. Revisado 5 Junio 2011.
http://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_Chacabuco

SANDOVAL H., Prendez M. y Ulriksen P. 1993. Contaminación Atmosférica de Santiago, Estado Actual y Soluciones.

SANHUEZA E., HOLZINGER R., DONOSO L., SANTANA M., FERNÁNDEZ E. y ROMERO J. 2001. Compuestos Orgánicos Volátiles en la Atmosfera de la Gran Sabana: Concentraciones y Química Atmosférica.

SEREMI DE SALUD RM. 2010. Metadata Datos Calidad del Aire MP-10-2010 RED MACAM 2 RM: "2010-CT10_VALIDADOS_FLMNOPQRSTV_20100124-OFICIAL".
<http://www.seremisaludrm.cl/sitio/pag/aire/indexjs3aireindices-prueba.asp>

SEREMI DE SALUD RM. 2010. Metadata Datos Calidad del Aire MP-2,5-2010 RED MACAM RM: "2010-CT2,5_VALIDADOS_FLMNOPQRSTV_20100124-OFICIAL".
<http://www.seremisaludrm.cl/sitio/pag/aire/indexjs3aireindices-prueba.asp>

SERPRAM. 2010. Informe Test de Quema 2009 Horno 9 Cemento Melón.

SINTEF. 2006. Formation and Release of POPs in the Cement Industry.

STEMMLER K. 2008. Polpaico Flotation Process: Contribution of the Raw Material Components, the Additives and the Process Steps to the VOC Emissions of the Cement Plant.

UDT UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN. 2008. Diagnostico para la Definición de Control de Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) a Nivel Industrial y Residencial.

UGARTE A. 2011. Humedal de Batuco Enero 2011, Chilebosque.

VELÁSQUEZ J. 2001. Curso Fabricación de Clinker.

WBCSD. 2005. Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry World Business Council for Sustainable Development.

VII ANEXOS

7.1 Tablas

Tabla 44. Cantidad de establecimientos según código CIUU presentes en la comuna de Tiltil. Año 2009.

Código CIUU	Glosa CIUU	Cantidad
5211	Venta al por menor en almacenes no especializados con surtido compuesto principalmente de alimentos, bebidas y tabaco	105
6023	Transporte de carga por carretera	61
5220	Venta al por menor de alimentos, bebidas y tabacos en almacenes especializados	52
111	Cultivo de cereales y otros cultivos n.c.p.	47
9309	Otras actividades de servicios n.c.p.	32
5520	Restaurantes, bares y cantinas	30
112	Cultivo de hortalizas y legumbres, especialidad hortícola y productos de viveros	17
7499	Otras actividades empresariales n.c.p.	17
5219	Venta al por menor de otros productos en pequeños almacenes no especializados	17
113	Cultivo de frutas, nueces, plantas cuyas hojas se utilizan para preparar bebidas y especias	16
6022	Otros tipos de transporte no regular de pasajeros por vía terrestre	14
4540	Obras menores en construcción (albañiles, carpinteros)	13
5233	Venta al por menor de aparatos, artículos y equipo de uso doméstico	12
6021	Otros tipo de transporte regular de pasajeros por vía terrestre	11
5190	Venta al por mayor de otros productos	11
5239	Venta al por menor de otros productos en almacenes especializados	10
1541	Elaboración de productos de panadería y galletas	9
5020	Mantenimiento y reparación de vehículos automotores	9
140	Actividades de servicios agrícolas y ganaderos, excepto las actividades veterinarias	8
5122	Venta al por mayor de alimentos, bebidas y tabaco	8
9199	Actividades de otras asociaciones n.c.p.	7
6599	El resto de los otros tipos de intermediación financiera	7
1320	Extracción de minerales metalíferos no ferrosos, excepto los minerales de cobre, uranio y torio	7
5234	Venta al por menor de artículos de ferretería, pinturas y productos de vidrio	7
8519	Otras actividades relacionadas con la salud humana	6
5121	Venta al por mayor de materias primas agropecuarias y de animales vivos	6
2919	Fabricación de otros tipos de maquinaria de uso general; Sus reparaciones	5
9219	Otras actividades de entretenimiento n.c.p.	5
6420	Telecomunicaciones	5
5110	Venta al por mayor a cambio de una retribución o por contrata	5
5232	Venta al por menor de productos textiles, prendas de vestir, calzados y artículos de cuero	5
122	Cría de otros animales; elaboración de productos animales n.c.p.	4
8010	Enseñanza preescolar y primaria	4
1410	Extracción de piedra, arena y arcilla	4
9249	Otras actividades de esparcimiento	4
5260	Reparación de efectos personales y enseres domésticos	4
5149	Venta al por mayor de otros productos intermedios, desperdicios y desechos	4
7111	Alquiler de equipo de transporte por vía terrestre sin operarios	3
4100	Captación, depuración y distribución de agua	3
1429	Explotación de otras minas y canteras n.c.p.	3
2811	Fabricación de productos metálicos para uso estructural	3
5510	Hoteles; campamentos y otros tipos de hospedaje temporal	3
9302	Peluquería y otros tratamientos de belleza	3
4510	Preparación del terreno	3
7412	Actividades de contabilidad, teneduría de libros y auditoría; asesoramiento en materia de impuestos	2
4520	Construcción de edificios completos o de partes de edificios; Obras de ingeniería civil	2
1514	Elaboración de aceites y grasas de origen vegetal y animal	2
1513	Elaboración y conservación de frutas, legumbres y hortalizas	2
3610	Fabricación de muebles	2
2899	Fabricación de otros productos elaborados de metal n.c.p.	2
7491	Obtención y dotación de personal	2
5259	Otros tipos de venta al por menor no realizadas en almacenes	2

5142	Venta al por mayor de metales y minerales metalíferos	2
5139	Venta al por mayor de otros enseres domésticos	2
5050	Venta al por menor de combustible para automotores	2
5030	Venta de partes, piezas y accesorios de vehículos automotores	1
4530	Acondicionamiento de edificios	1
7421	Actividades de arquitectura e ingeniería y actividades conexas de asesoramiento técnico	1
8511	Actividades de hospitales	1
2221	Actividades de impresión	1
7492	Actividades de investigación y seguridad	1
7511	Actividades de la administración pública, Poder Ejecutivo	1
8512	Actividades de médicos y odontólogos	1
7010	Actividades inmobiliarias realizadas con bienes propios o arrendados	1
8520	Actividades veterinarias	1
7129	Alquiler de otros tipos de maquinarias y equipos n.c.p.	1
2010	Aserrado y acepilladura de maderas	1
7220	Consultores en programas de informática y suministro de programas de informática	1
121	Cría de ganado vacuno y de ovejas, cabras, caballos, asnos, mulas y burdéganos, cría de ganado lechero	1
130	Cultivo de productos agrícolas en combinación con la cría de animales (explotación mixta)	1
1553	Elaboración de bebidas malteadas, cervezas y maltas	1
1549	Elaboración de otros productos alimenticios n.c.p.	1
1721	Fabricación de artículos confeccionados de materias textiles, excepto prendas de vestir	1
4020	Fabricación de gas; distribución de combustibles gaseosos por tuberías	1
3150	Fabricación de lámparas y equipo de iluminación; Reparación de equipos de iluminación	1
3599	Fabricación de otros equipos de transporte n.c.p.	1
2699	Fabricación de otros productos minerales no metálicos	1
1810	Fabricación de prendas de vestir, excepto prendas de piel	1
4010	Generación, captación y distribución de energía eléctrica	1
2219	Otras actividades de edición	1
9303	Pompas fúnebres y actividades conexas	1
7430	Publicidad	1
5141	Venta al por mayor de combustibles sólidos, líquidos, gaseosos y productos conexas	1

7.2 Figuras

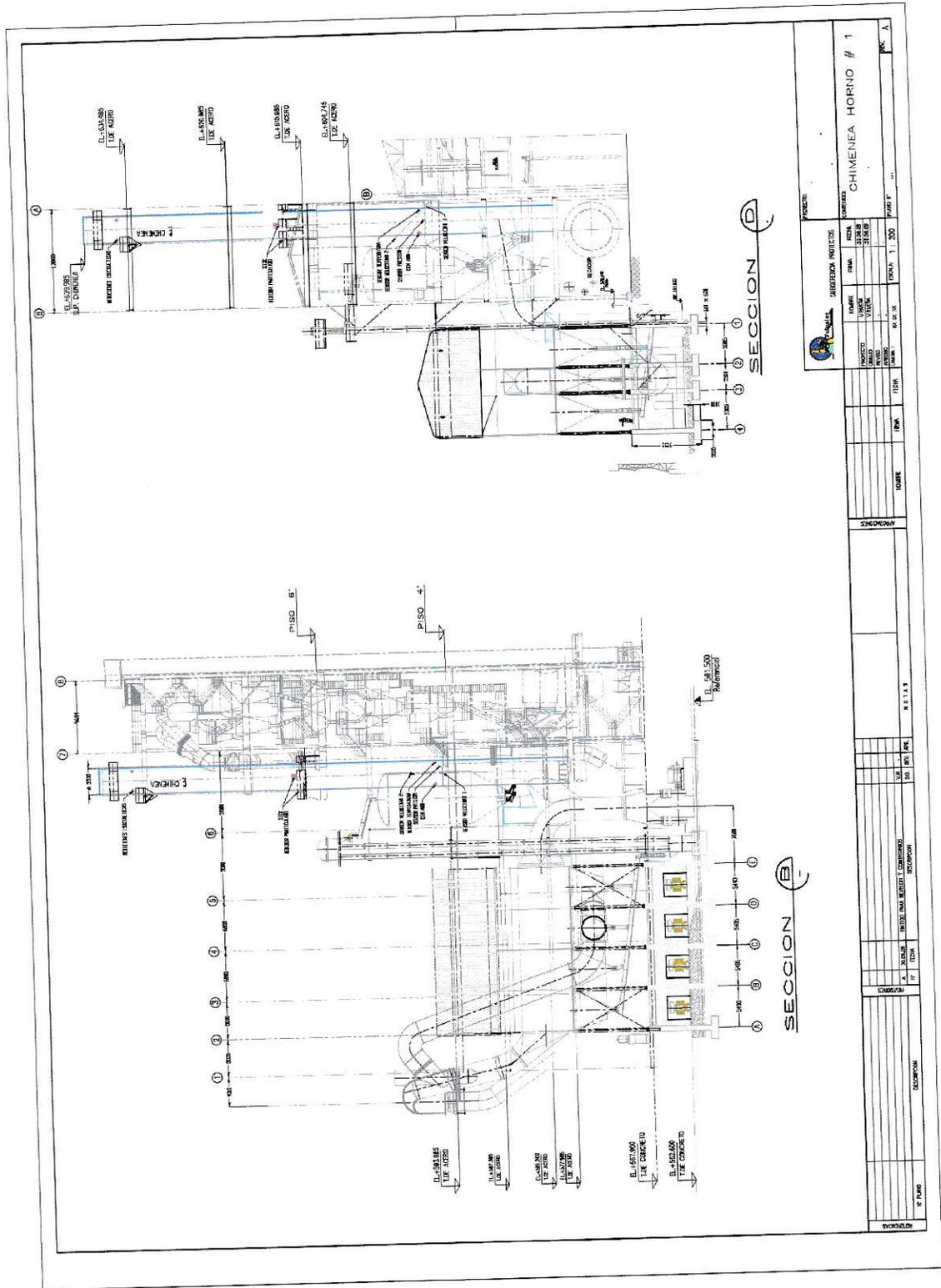


Figura 42. Plano de Ubicación de Chimenea en Horno 1 de Planta Polpaico. 2009

7.3 Cálculos

- Cálculos Conversión de Unidades

Cemento Polpaico:

$$\text{COV expresado como propano} > 6,1 \text{ ppm} * \frac{36}{24,4} = 9 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\text{CH}_4 \text{ expresado como metano} > 2,4 \text{ ppm} * \frac{12}{24,4} = 1,18 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\text{COT} = 9 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right] + 1,18 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right] = 10,18 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right]$$

$$10,18 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right] * 269027 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] * \left[\frac{24\text{h}}{1\text{día}} \right] * \left[\frac{365\text{días}}{1\text{año}} \right] * \left[\frac{1\text{Kg}}{1000\text{g}} \right] * \left[\frac{1\text{T}}{1000\text{Kg}} \right] * \frac{1}{1000} = 23,99 \left[\frac{\text{T}}{\text{año}} \right]$$

Cemento Melón:

$$\text{THC expresado como metano} > 19,7 \text{ ppm} * \frac{12}{24,4} = 9,69 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\text{CH}_4 \text{ expresado como metano} > 4,44 \text{ ppm} * \frac{12}{24,4} = 2,18 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\text{COT} = 9,69 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right] + 2,18 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right] = 11,87 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right]$$

$$11,87 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{m}^3} \right] * 165970 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] * \left[\frac{24\text{h}}{1\text{día}} \right] * \left[\frac{365\text{días}}{1\text{año}} \right] * \left[\frac{1\text{Kg}}{1000\text{g}} \right] * \left[\frac{1\text{T}}{1000\text{Kg}} \right] * \frac{1}{1000} = 17,26 \left[\frac{\text{T}}{\text{año}} \right]$$

- Cálculos Balance de Masa COT

Determinación de Flujo de Salida de Clinker

$$\text{Prueba 1} \Rightarrow \frac{152,17 \frac{\text{T}}{\text{h}}}{1,91} = 79,67 \frac{\text{T}}{\text{h}}$$

$$\text{Prueba 2} \Rightarrow \frac{153,13 \frac{\text{T}}{\text{h}}}{1,91} = 80,17 \frac{\text{T}}{\text{h}}$$

$$\text{Prueba 3} \Rightarrow \frac{153,14 \frac{\text{T}}{\text{h}}}{1,91} = 80,18 \frac{\text{T}}{\text{h}}$$

$$\text{Prueba 4} \Rightarrow \frac{150,81 \frac{\text{T}}{\text{h}}}{1,91} = 78,96 \frac{\text{T}}{\text{h}}$$

Determinación de Flujo de Entrada de Crudo, restando la Fracción de Recirculación

$$\text{Prueba 1} \Rightarrow 152,17 \frac{\text{T}}{\text{h}} - 152,17 \frac{\text{T}}{\text{h}} * 0,189 = 123,49 \frac{\text{T}}{\text{h}}$$

$$\text{Prueba 2} \Rightarrow 153,13 \frac{\text{T}}{\text{h}} - 153,13 \frac{\text{T}}{\text{h}} * 0,189 = 124,27 \frac{\text{T}}{\text{h}}$$

$$\text{Prueba 3} \Rightarrow 153,14 \frac{\text{T}}{\text{h}} - 153,14 \frac{\text{T}}{\text{h}} * 0,189 = 124,28 \frac{\text{T}}{\text{h}}$$

$$\text{Prueba 4} \Rightarrow 150,81 \frac{\text{T}}{\text{h}} - 150,81 \frac{\text{T}}{\text{h}} * 0,189 = 122,38 \frac{\text{T}}{\text{h}}$$

Transformación de Emisiones de COT en unidades de mg/N m³ a unidades de T/h

$$\text{Prueba 1} \Rightarrow 31,68 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} * 250344 \frac{\text{m}^3}{\text{Nh}} * \frac{1\text{g}}{1000 \text{mg}} * \frac{1\text{Kg}}{1000 \text{g}} * \frac{1\text{T}}{1000 \text{Kg}} = 0,0079 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{Prueba 2} \Rightarrow 31,44 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} * 260316 \frac{\text{m}^3}{\text{Nh}} * \frac{1\text{g}}{1000 \text{mg}} * \frac{1\text{Kg}}{1000 \text{g}} * \frac{1\text{T}}{1000 \text{Kg}} = 0,0082 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{Prueba 3} \Rightarrow 32,56 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} * 246276 \frac{\text{m}^3}{\text{Nh}} * \frac{1\text{g}}{1000 \text{mg}} * \frac{1\text{Kg}}{1000 \text{g}} * \frac{1\text{T}}{1000 \text{Kg}} = 0,0080 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{Prueba 4} \Rightarrow 30,99 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} * 248040 \frac{\text{m}^3}{\text{Nh}} * \frac{1\text{g}}{1000 \text{mg}} * \frac{1\text{Kg}}{1000 \text{g}} * \frac{1\text{T}}{1000 \text{Kg}} = 0,0077 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

Determinación de Flujo Másico de COT en Entradas y Salidas del Modelo de

Balance de Masa de COT

Prueba 1 ⇒

$$\text{COT * Crudo} : 152,17 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,19}{100} = 0,2346 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{COT * Clinker} : 79,67 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,01}{100} = 0,008 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{COT * Petcoke} : 6,68 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,09}{100} = 0,006 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{COT * CSSf} : 1,79 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{22,04}{100} = 0,3944 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

Prueba 2 ⇒

$$\text{COT * Crudo} : 153,13 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,19}{100} = 0,2361 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{COT * Clinker} : 80,17 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,01}{100} = 0,008 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{COT * Petcoke} : 7,01 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,09}{100} = 0,0063 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{COT * CSL} : 0,71 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,09}{100} = 0,0006 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

Prueba 3 ⇒

$$\text{COT * Crudo} : 153,14 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,19}{100} = 0,2361 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{COT * Clinker} : 80,18 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,01}{100} = 0,008 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{COT * Petcoke} : 7,66 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,09}{100} = 0,0069 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{COT * CSSg} : 0,52 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{37,73}{100} = 0,1957 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

Prueba 4 ⇒

$$\text{COT * Crudo} : 150,81 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,19}{100} = 0,2325 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{COT * Clinker} : 78,96 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,01}{100} = 0,0079 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$

$$\text{COT * Petcoke} : 6,64 \frac{\text{T}}{\text{h}} * \frac{0,09}{100} = 0,0069 \frac{\text{T}}{\text{hN}}$$