

01177

18



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO DE INGENIERÍA

**METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES
AL AGUA. INDUSTRIA DE LA CELULOSA Y PAPEL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA (AMBIENTAL)

P R E S E N T A:

ING. ENGELBERTH SOTO ESTRADA

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. RINA AGUIRRE SALDIVAR

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNAM
DIRECCIÓN GENERAL DE
ESTUDIOS DE POSGRADO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F.

JUNIO DE 2002



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Metodología para la estimación de emisiones contaminantes al agua. Industria de la celulosa y papel

Siglas y acrónimos		3
Glosario		6
Índice de cuadros		14
Índice de figuras		16
Capítulo 1	Introducción	17
1.1	Antecedentes	18
1.2	Objetivo	19
1.3	Alcances	19
Capítulo 2	Generalidades	21
2.1	Política y administración ambiental en México	21
2.2	Registros de emisiones	23
2.2.1	Panorama general de los PRTR de América del Norte	24
2.2.2	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de México (RETC)	26
2.3	Inventario Nacional de Descargas de Aguas Residuales (INDAR)	29
2.4	Cédula de Operación Anual (COA)	30
2.5	Métodos indirectos para la estimación de emisiones contaminantes	31
2.5.1	Factores de emisión	32
2.5.2	Extrapolación	33
2.5.3	Balance de materiales	33
2.5.4	Cálculos de ingeniería	34
2.5.5	Modelos matemáticos	34
Capítulo 3	Fuentes de emisiones contaminantes en México	36
3.1	Panorama de la industria mexicana	36
3.1.1	Uso de agua en México	38
3.1.2	Fuentes generadoras de agua residual industrial	39
3.2	Industria de la celulosa y papel	40
3.2.1	Importancia económica	44
3.2.2	Proceso de fabricación de celulosa	44

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

	3.2.3	Proceso de fabricación de papel	54
	3.2.4	Servicios auxiliares	57
	3.2.5	Emisiones contaminantes en la fabricación de celulosa y papel	59
Capítulo 4	Metodología de estimación		64
	4.1	Identificación de sustancias emitidas	64
	4.2	Confiabilidad de la información	67
	4.3	Ácidos resinosos	68
	4.4	Ácidos grasos	82
	4.5	Biocidas	84
	4.6	Dioxinas y furanos	86
	4.7	Compuestos fenólicos clorados	89
	4.8	Halógenos orgánicos adsorbibles (AOX)	92
	4.9	Ácidos resinosos clorados	94
	4.10	Compuestos orgánicos volátiles	95
	4.11	Azufre total reducido	97
	4.12	Metales pesados	97
Capítulo 5	Estimación de emisiones		100
	5.1	Análisis de la información	100
	5.2	Análisis de escenarios	103
	5.3	Estimación de emisiones	104
	5.3.1	Ácidos resinosos	105
	5.3.2	Ácidos grasos	106
	5.3.3	Dioxinas y furanos	106
	5.3.4	Compuestos fenólicos clorados	107
	5.3.5	Halógenos orgánicos adsorbibles (AOX)	108
	5.3.6	Ácidos resinosos clorados	108
	5.3.7	Cloroformo	108
	5.3.8	Metales pesados	109
	5.3.9	Pentaclorofenol	110
	5.4	Resultados	110
	5.5	Discusión de resultados	116
Capítulo 6	Conclusiones y recomendaciones		118
Bibliografía			121
Anexo	Lista de sustancias RETC		128

Siglas y acrónimos

ACAAN	Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte
ADt	<i>Air Dried ton</i> Toneladas métricas secadas al aire de celulosa
AOX	<i>Adsorbable Organic Halide Indicator</i> Indicador de Halógenos Orgánicos Adsorbibles
CAS	<i>Chemical Abstract Service</i>
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte
CEPA	<i>Canadian Environmental Protection Act</i> Ley Canadiense de Protección del Ambiente
CICEPLA	Confederación Industrial de la Celulosa y del Papel en Latinoamérica
CL ₅₀	Concentración letal que produce 50% de mortalidad en los organismos analizados
CNA	Comisión Nacional del Agua
CNICP	Cámara Nacional de las Industrias de la Celulosa y del Papel
COA	Cédula de Operación Anual
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días
DEPA	<i>Danish Environmental Protection Agency</i> Agencia de Protección Ambiental de Dinamarca
ECF	<i>Elemental Chlorine Free</i> Sistema de blanqueo libre de cloro elemental
EPCRA	<i>Emergency Planning and Right-To-Know Act</i> Ley de Planeación para Emergencias y Derecho a la Información de Estados Unidos
GATT	<i>General Agreement on Tariffs and Trade</i> Acuerdo Internacional sobre Aranceles y Comercio

GEPA	<i>German Environmental Protection Agency</i> Agencia de Protección Ambiental de Alemania
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i> Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
INDAR	Inventario Nacional de Descargas de Aguas Residuales
ISO	<i>International Standards Organization</i> Organización Internacional de Normas
LAU	Licencia Ambiental Única
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
µg/l	microgramos por litro
NAPRI	<i>North America Pollutant Release Inventory</i> Registro de Emisiones Contaminantes de América del Norte
ng/l	nanogramos por litro
NPRI	<i>National Pollutant Release Inventory</i> Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes de Canadá
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PCDD	Policlorodibenzodioxinas
PCDF	Policlorodibenzofuranos
PCP	Pentaclorofenol
pg/l	picogramos por litro
PIB	Producto Interno Bruto
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PRTR	<i>Pollutant Release and Transfer Register</i> Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes

RETC	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de México
SEMARNAP	Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (antes SEMARNAP)
SINIA	Sistema Nacional de Información Ambiental
SST	Sólidos Suspendidos Totales
TCF	<i>Totally Chlorine Free</i> Sistema de blanqueo libre de cloro
TLC	Tratado de Libre Comercio de América del Norte
TRI	<i>Toxics Release Inventory</i> Inventario de Emisiones Tóxicas de Estados Unidos
TRS	<i>Total Reduced Sulphur</i> Azufre total reducido
UNITAR	<i>United Nations Institute for Training and Research</i> Instituto de las Naciones Unidas para la Capacitación y la Investigación
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
VOC	<i>Volatile Organic Compounds</i> Compuestos Orgánicos Volátiles

Agentes de blanqueo. Una variedad de reactivos químicos usados en el blanqueo de pulpa como cloro (Cl_2), hipoclorito de sodio (NaOCl), hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$), dióxido de cloro (ClO_2), peróxido (H_2O_2), oxígeno (O_2), ozono (O_3) y otros. Todos referidos como agentes de blanqueo.

Agua blanca. Término con el que se designan todas las aguas que en las papeleras y en las fábricas de materias fibrosas contienen en suspensión fibras, materiales de carga y otras sustancias sólidas empleadas en la fabricación. Son aguas blancas las que escurren a través de las telas de los fieltros, de los espesadores y condensadores, así como también el agua de deshidratación desgotada a través de la tela de la mesa de fabricación y el agua residual.

Aguas residuales. Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domésticos y en general de cualquier otro uso.

Álcali. Sustancia que se disuelve en agua formando una disolución alcalina. Se habla a menudo de los álcalis como bases, pero el término "base" tiene un significado más amplio.

Álcali activo. Es una forma de expresar la concentración de los compuestos alcalinos en un licor de cocción también alcalino. Es igual a la concentración de hidróxido de sodio más la de sulfuro de sodio, expresadas en gramos de hidróxido de sodio u óxido de sodio por litro de licor.

Álcali efectivo. Es una forma de expresar la concentración de los compuestos alcalinos en un licor de cocción. Es igual a la cantidad de sosa más la mitad de la de sulfuro de sodio, expresada en gramos de sodio y óxido de sodio por litro de licor.

Álcali total. Es la suma de $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4$, el resultado se expresa como Na_2O .

AOX. Adsorbable organic halogens (AOX). Indicador que mide la masa total de compuestos organoclorados en agua y agua residual. Su medida puede realizarse a través del estándar alemán DIN 38-409 o alguna prueba similar. El cloro es el único halógeno usado en cantidades significativas en industrias productoras de pulpa. La medida expresa unidades de peso de halógenos (cloro) y no el peso de la molécula orgánica entera.

Astilla. Trozo pequeño de madera obtenido en un astillador con dimensiones proporcionales a la capacidad de impregnación. Una astilla tiene, normalmente, una longitud de 10 a 30 mm en la dirección de la fibra, y un espesor de 2 a 10 mm.

Bagazo de caña de azúcar. Residuo fibroso que queda después de la extracción del azúcar de la caña. Se utiliza industrialmente para la preparación de pulpa celulósica, tanto cruda como blanqueada, especialmente con procedimientos de tipo alcalino.

Batido. Consiste en mezclar al mismo tiempo, en suspensión acuosa, los diferentes materiales y en impartirles, mediante una acción mecánica, las propiedades que determinan las características del producto final. Los principales efectos del batido son físicos, entre los más importantes están los siguientes: fractura y separación parcial de la pared primaria de la fibra, disminución de la longitud de la fibra, aumento de flexibilidad, formación de fibrilas (fibrilación), y aumento en la superficie específica de la fibra.

Biocida. Material tóxico para el control microbiológico. Los biocidas son usados en los sistemas de circulación de agua de la producción de pulpa y papel, en busca de contrarrestar la formación de limo.

Blancura. Como comúnmente es utilizada en la industria del papel: la reflectividad de una hoja de pulpa, papel o cartón medida bajo una luz específica en condiciones estandarizadas, relativa o un estándar de óxido de magnesio.

Blanqueo. Proceso adicional de deslignificación de la pulpa por tratamiento químico para alterar la materia que provoca color, impartiendo una alta blancura.

Calandrado. El término se refiere al alisamiento del papel.

Cargas. La carga del papel se refiere a la incorporación de materiales inorgánicos en la hoja fibrosa para mejorar su calidad. Un papel hecho exclusivamente con fibras tendrá una superficie discontinua con crestas, valles y huecos. Las cargas pueden cubrir las cavidades y reducir las irregularidades. Dichas cargas a menudo se agregan a los papeles para mejorar su blancura. La presencia de carga se vuelve muy importante en los papeles calandreados o supercalandreados. Los papeles o cartones para impresión requieren una muy buena o excelente lisura en la superficie.

Cartón. Papel de un gramaje generalmente superior a 250 g/m².

Categorías de sustancias. Grupos de productos químicos estrechamente relacionados.

CL₅₀. Concentración letal a la cual una sustancia se estima que produce una mortalidad del 50% del grupo de organismos expuestos. La mayoría de las veces es especificada en referencia con la duración de la exposición.

Cocción extendida. Parte del proceso de delignificación extendida implementado en el digestor.

Colofonia. Resina sólida obtenida separando por destilación la esencia de trementina o aguarrás extraídos de los pinos. La colofonia está constituida por un 90-95% de ácidos resinosos y un 5-10% de insaponificables. Su principal componente es una familia de ácidos tricíclicos llamados ácidos o resinas de colofonia; el ácido abiético es uno de ellos. La colofonia es el agente más usado para el encolado interno.

Coníferas. Se les llama al conjunto de especies de los géneros: pinus, abies, cupressus, juniperus, pseudotsuga y picea.

Consistencia. Por consistencia se entiende el porcentaje, en peso, de fibra en cualquier combinación de fibra y agua.

Corteza. Capa exterior, aislante y protectora, de la madera, en las raíces, fuste y ramas del árbol.

Delignificación extendida. Grupo de procesos desarrollados hace 20 años para extender el proceso kraft más allá de los tradicionales niveles de kappa (30 para softwood, 15 para hardwood) sin el uso de compuestos de cloro. El método incluye cocción extendida, delignificación con oxígeno, delignificación con ozono y otros procesos de delignificación previos al blanqueo.

Delignificación con oxígeno. Proceso usado después del lavado de la pulpa café, previo al blanqueo. En este proceso, que puede ser usado en pulpas kraft o al sulfito, se utiliza oxígeno gas en un ambiente alcalino para delignificar la pulpa. Ya que la delignificación con oxígeno comúnmente precede la aplicación de cloro, las aguas residuales de este proceso pueden ser retornadas al sistema de recuperación de químicos.

Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO₅). Esta medida representa la cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar biológicamente la materia orgánica contenida en una muestra de agua, incubada durante cinco días. Con esta medida se pretende reproducir el consumo de oxígeno en un medio natural, como podría ser un río, ocasionado por el vertido de agua residual. La temperatura del ensayo es 20° C y su duración corresponde a una estabilización del 60-70 por ciento de la materia orgánica.

Descarga. La acción de depositar, verter, infiltrar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor.

Destintado de pulpa. Recuperación de fibras mediante papel de desperdicio, removiendo tinta, color y acondicionadores.

Digestor. Recipiente usado para el tratamiento químico de astillas y otras fibras celulósicas como paja, bagazo, etc., bajo elevada temperatura y presión en busca de separar las fibras.

Dióxido de cloro (ClO₂). Gas de color naranja amarillo que se forma por la acción de ácido sulfúrico concentrado sobre clorato de potasio. Es un poderoso agente oxidante. Se utiliza para purificar agua y como blanqueador en la industria del papel.

Dioxinas y furanos. Familia de 210 sustancias, dos de ellas particularmente importantes desde el punto de vista toxicológico 2,3,7,8-tetracloro-p-dibenzodioxina (2,3,7,8-TCDD) y 2,3,7,8-tetraclorodibenzofurano (2,3,7,8 TCDF).

ECF. (Elemental Chlorine Free) Proceso para blanquear pulpas en la ausencia de cloro elemental e hipoclorito, donde es usado dióxido de cloro como el único agente de blanqueo que contiene cloro.

Efluente de la planta de blanqueo. La descarga total de aguas residuales procedentes de la planta de blanqueo, de cada línea de blanqueo operada en la industria.

Emisión contaminante. La descarga directa o indirecta de toda sustancia o energía, en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o al actuar en cualquier medio altere o modifique su composición o condición natural.

Encolado. La adición de encolantes tiene como objetivos principales otorgar al papel propiedades permeables, aumentar su resistencia a la tensión, al doblar y, junto con las cargas, propiciar una superficie que sea adecuada a la escritura e impresión. Entre los encolantes más utilizados en México se encuentran las breas de colofonia, almidones modificados, carboximetilcelulosa, y recientemente resinas sintéticas de urea-formaldehído o de melaminaformaldehído.

Etapas de blanqueo. Una de las unidades de proceso, en la cual un agente de blanqueo o combinación de ellos es adicionado en la secuencia de un sistema continuo de blanqueo.

Evaporadores. Equipos donde se concentra el licor negro proveniente del lavado de la pulpa para ser luego fundido en el horno de recuperación.

Fenol. Tipo de compuesto orgánico en el cual un grupo hidroxilo está enlazado directamente con uno de los átomos de carbono de un anillo aromático.

Fibra. Elemento morfológico fundamental de las plantas superiores. Las fibras son un cúmulo de células de forma aproximadamente cilíndrica, de longitud y diámetro variable.

Fibra secundaria. Son todas aquellas fibras que ya han sido sujetas de un proceso de fabricación de papel y que previa su recuperación y clasificación, son nuevamente seleccionadas para reprocesarse y fabricar nuevamente papel.

Fibra virgen. Fibra que no ha sido utilizada previamente en ningún producto de papel o cartón. Las fibras que vuelven al proceso, procedentes de la máquina de papel, se clasifican normalmente como fibras vírgenes.

Fibrilación. El fabricante de papel considera que una pasta preparada con un juego de cuchillas romas, se fibrila o escobilla. Si se observa al microscopio, cuando las fibrilas se aflojan de la fibra original, ésta aparece como "escobillada" o fibrilada parcialmente.

Genotóxico. Que causa daño genético al material hereditario de organismos vivos, por ejemplo los componentes del DNA.

Grado de polimerización. Número de unidades de monómero por molécula media de polímero.

Gramaje. Masa de pulpa, papel o cartón, expresada en gramos por metro cuadrado, medida según condiciones normalizadas.

Hardwood. Madera de árboles dicotiledóneos como nogal, eucalipto, caoba y encino.

Hemicelulosas. Celulosa que contiene un grado de polimerización de 150 o menos. Término colectivo para beta y gamma celulosa.

Hipoclorito. Agente de blanqueo usualmente en forma de hipoclorito de calcio o hipoclorito de sodio usado en el blanqueo de pulpas químicas.

Insumos directos. Aquellos materiales o sustancias que intervienen en el proceso productivo o de tratamiento. Incluyen materias primas.

Insumos indirectos. Aquellos materiales o sustancias que no intervienen de manera directa en los procesos productivos o de tratamiento y son empleados dentro del establecimiento en servicios auxiliares, en mantenimiento y limpieza, en laboratorios, etc.

Licor blanco. Nombre aplicado a los licores que se generan caustificando los licores de recuperación. Los licores blancos están listos para ser empleados en el digestor.

Licor gastado. Licor de cocción usado en la producción de pulpas químicas, que es separado de la pulpa después del proceso de cocción. El licor gastado de pulpas kraft es llamado licor negro. El licor gastado de pulpas al sulfato es llamado licor rojo.

Licor negro. Nombre aplicado a los licores que se recuperan de los digestores y que son conducidos hasta su incineración en el proceso de recuperación de químicos. El licor negro a la salida del digestor está compuesto principalmente de material orgánico disuelto (lignina) y sales residuales del licor blanco, generalmente con una concentración de 15 a 18% de sólidos.

Licor verde. Solución diluida de carbonato de sodio y sulfuro de sodio, de color verde, que se forma al disolverse las cenizas fundidas provenientes del horno de recuperación en el tanque de disolución de licor verde.

Lignina. La lignina es un complejo polímero aromático constituido por unidades fenil-propano, que proporciona resistencia y rigidez a los tejidos de las plantas vasculares.

Máquina de papel. La principal máquina en una industria papelera en la cual la pasta que contiene fibras y otros constituyentes se convierte en hojas por el drenado de agua, presión, secado y enrollada.

Mercaptanos. Productos orgánicos azufrados, producidos en el proceso kraft, al que dan su olor característico.

Método de estimación. El método empleado para la estimación de las cantidades reportadas. Esto es: medición directa, balance de materiales, empleo de factores de emisión, etc.

Mutagénico. Sustancia que puede causar daño al material genético hereditario, por ejemplo el DNA de los genes.

Número kappa. Medida del contenido de lignina en la pulpa, de acuerdo con un procedimiento estándar de laboratorio (TAPPI T-236). Los grados de blanqueo de la pulpa sin blanquear generalmente tienen un número kappa de 5 a 35, dependiendo de las especies de madera y del proceso de deslignificación.

Organoclorados. Familia de compuestos que contienen ligas de carbonos clorados, algunos de ellos se forman en el proceso de blanqueo de pulpa. Se cuantifican como AOX, que es la medida estándar reconocida internacionalmente por la comunidad científica.

Óxidos de azufre. El dióxido y el trióxido de azufre se nombran en forma conjunta como óxidos de azufre, SO_x. El dióxido de azufre (SO₂) es un contaminante primario que se produce en la combustión de compuestos que contienen azufre. Se forma cuando se quema carbón y petróleo que contienen dicho elemento: $S(\text{combustible}) + O_2 \rightarrow SO_2$. El trióxido de azufre (SO₃) se forma debido a la reacción entre el dióxido de azufre y el oxígeno $2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3$.

Óxidos de nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno, el monóxido (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), son contaminantes primarios del aire. El óxido nítrico se forma mediante la reacción de oxígeno y nitrógeno en el aire: $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$. Esta reacción se produce a altas temperaturas durante la ignición de combustibles fósiles. El dióxido de nitrógeno se forma debido a la reacción del monóxido de nitrógeno con el oxígeno del aire: $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$.

Papel. Lámina constituida esencialmente por fibras celulósicas de origen natural y otras sustancias orgánicas e inorgánicas que se entrelazan y forman una hoja afieltrada. Por encima de un cierto gramaje o de una cierta rigidez, el papel se denomina cartulina o cartón.

Pasta. La pasta es la mezcla, en determinadas proporciones, de materiales fibrosos y de otro tipo que se están acondicionando o preparando para la máquina de papel.

Peróxido. Nombre corto para peróxido de hidrógeno (H₂O₂) o peróxido de sodio (Na₂O₂).

Persistencia ambiental. La persistencia ambiental se relaciona con la tendencia de una sustancia a permanecer en el ambiente, debido a su resistencia a la degradación química o biológica asociada a los procesos naturales. Una vida media corta (pocos días) generalmente no produce una acumulación significativa en el ambiente. Contrario a esto una sustancia con una vida media mayor puede resultar en una exposición sustancial o acumulación en la cadena alimenticia.

Planta de blanqueo. Todos los procesos y equipos usados para blanqueo, comenzando con la primer aplicación de agentes de blanqueo (cloro, dióxido de cloro, ozono, hipoclorito de sodio o calcio, o peróxido) y cada etapa donde los agentes de blanqueo son aplicados a la pulpa.

Pulpa. La pulpa o fibra, o material intermedio, es el material fibroso preparado y listo para el proceso de preparación de la pasta. Puede ser sin blanquear o blanqueada, en forma de hojas o rollos secos, paquetes húmedos, a granel, o cualquiera otra forma apropiada para fines comerciales.

Pulpa blanqueada. Pulpa que ha sido purificada o blanqueada, por tratamiento químico, para alterar o remover sustancias que provean color, que ha tomado una alta blancura característica.

Pulpa mecánica. Se obtiene únicamente por un procedimiento mecánico, es decir, por molido o raspado (desfibrado) de madera previamente descortezada.

Pulpa termomecánica. Se obtiene en refinadores ablandando partículas de madera, después de un tratamiento térmico de la madera con vapor a presión elevada.

Pulpa química de madera al sulfato. Se obtiene por cocción de la madera, generalmente en trozos pequeños, en disoluciones fuertemente alcalinas. O sea, disolución de sosa cáustica modificada.

Pulpa químico-termomecánica o pasta semiquímica. Se obtiene por un procedimiento que consta de dos partes, durante las cuales la madera, generalmente en virutas, se suaviza primero por medios químicos en autoclaves y después se refina mecánicamente. Esta pasta contiene gran cantidad de impurezas o materias leñosas y se utiliza esencialmente para la fabricación de papel de mediana calidad. Puede ser blanqueada o sin blanquear.

Pulpeo. El proceso de pulpeo o también conocido como proceso de rompimiento, desintegración o simplemente de suspensión, consiste en reducir el material seco a pulpa, agregando la cantidad suficiente de agua para adaptarlo al proceso, y en liberarlo del exceso de haces de fibras u otros materiales no desmenuzados.

Punto de emisión. Todo equipo, maquinaria o actividad que emite contaminantes a la atmósfera o al agua de manera directa. Un mismo punto de emisión puede corresponder a varios puntos de generación.

Punto de consumo. Todo equipo, maquinaria o en la que se utiliza agua, energía y/o insumos de producción, directos y/o indirectos.

Punto de generación. Todo equipo, maquinaria o actividad que genera contaminantes al aire, al agua y/o residuos peligrosos. Pueden compartir un mismo punto de emisión (chimenea o ducto de descarga) y en ocasiones poseer puntos múltiples de emisión.

Rechazos. Usualmente se compone de material que no fue cocido en su totalidad, denominado comúnmente nudos o rechazos

Refinación. La refinación es un proceso mecánico al cual se sujetan las fibras, algunas ocasiones después del batido o de manera independiente. En esta etapa las fibras se peinan y con frecuencia se reducen en longitud, con objeto de adaptarlas para la formación sobre la máquina de papel o cartón.

Reúso. Proceso de utilización de los residuos que han sido tratados y que se aplicarán a un nuevo proceso de transformación u otros usos.

Secuencia de blanqueo. Es la secuencia en que los agentes de blanqueo son usados para blanquear la pulpa.

Softwood. Madera obtenida de árboles de coníferas, como pino y abeto.

Sólidos totales. Los sólidos presentes en una muestra de agua representan todo el material contaminante suspendido o disuelto, dividido a su vez en materia orgánica e inorgánica. Los sólidos disueltos totales (SDT) se deben a materiales solubles, mientras que los sólidos en suspensión (SST) a partículas discretas que se pueden medir al filtrar una muestra a través de un papel fino. Ambos sólidos se dividen a su vez en fijos y volátiles (inorgánicos y orgánicos).

Subletal. Concentración o nivel de una sustancia que no causa directamente muerte.

Sulfidez. En el licor blanco, relación de porcentaje del Na_2S al álcali activo, expresados ambos como Na_2O ; en el licor vedado, razón de porcentaje del Na_2S al álcali total, expresados ambos como Na_2O .

TEQ. Toxicidad equivalente, calculada al sumar los productos obtenidos multiplicando la concentración de las distintas dioxinas y furanos presentes en una muestra, por su factor de toxicidad equivalente (TEF); donde la 2,3,7,8-TCDD tiene asignado un TEF de 1.0.

Toxicidad. La toxicidad se divide en 7 características que incluyen los efectos letales, crónicos y subcrónicos para todos los blancos ambientales y principalmente los efectos adversos potenciales de las sustancias sobre la salud humana.

Transferencia. Es el traslado de contaminantes a un lugar que se encuentra físicamente separado del establecimiento que lo generó. Incluye entre otros: a) Descarga de aguas residuales al alcantarillado público; b) Transferencia para reciclamiento, recuperación o regeneración; c) Transferencia para recuperación de energía fuera del establecimiento; y d) Transferencia para tratamientos como neutralización, tratamiento biológico, incineración o separación física.

Tratamiento secundario. Etapa aerobia o anaerobia del tratamiento de agua residual, en la cual los microorganismos oxidan y descomponen los constituyentes orgánicos del efluente, reduciendo usualmente la toxicidad.

TRS. Corresponde a la sigla inglesa de Total Reduced Sulphur, con él se representan los compuestos organosulfurados formados durante la etapa de cocción de la madera en el proceso de producción de celulosa kraft.

Índice de cuadros

2.1	Descarga de agua residual no municipal, por categoría de carga contaminante	29
2.2	Jerarquización de los métodos de estimación	35
3.1	Porcentaje de participación al PIB nacional por sector económico (1996)	37
3.2	Porcentaje de participación al PIB industrial, ramas manufactureras (1996)	37
3.3	DBO ₅ y SST en las descargas de agua residual industrial	40
3.4	Producción de celulosa en Latinoamérica 1999	43
3.5	Producción de papel y cartón en Latinoamérica 1999	45
3.6	Principales productos utilizados en el proceso de blanqueo en las industrias productoras de celulosa de Estados Unidos	50
3.7	Secuencias de blanqueo	50
3.8	Tabla resumen, fabricación de celulosa y papel	58
3.9	Contaminantes que pueden ser emitidos durante la fabricación de pulpa y papel	61
4.1	Identificación de sustancias emitidas al agua durante la fabricación de pulpa tipo kraft y papel	65
4.2	Criterio de confiabilidad y factor de aplicabilidad	68
4.3	Cálculo de emisiones de la producción de pulpa kraft y papel	69
4.4	CL ₅₀ 96h de ácidos resinosos, para salmón	80
4.5	Fuentes de información para emisión de ácidos resinosos	80
4.6	Intervalos y valores promedio para la emisión de ácidos resinosos, proceso kraft	81
4.7	Eficiencias de remoción para ácidos grasos y resinosos	81
4.8	Consideraciones para la estimación de ácidos resinosos	82
4.9	Intervalos y valores promedio para la emisión de ácidos grasos, proceso kraft	83
4.10	Consideraciones para la estimación de ácidos grasos	83
4.11	Predicción de concentraciones en el ambiente para limocidas	85
4.12	Consideraciones para la estimación de limocidas	86
4.13	Intervalos y valores promedio para la emisión de dioxinas y furanos, proceso kraft	88
4.14	Consideraciones para la estimación de dioxinas y furanos	88
4.15	TEF para compuestos fenólicos clorados	89
4.16	CL ₅₀ a 96h de compuestos fenólicos clorados, para trucha arco iris	89
4.17	Intervalos y valores promedio para compuestos fenólicos clorados, proceso kraft con blanqueo convencional	90
4.18	Intervalos y valores promedio para compuestos fenólicos clorados, proceso kraft con blanqueo ECF ²	90

4.19	Porcentajes de remoción para compuestos fenólicos clorados	91
4.20	Consideraciones para la estimación de compuestos fenólicos clorados	91
4.21	Intervalos y valores promedio para emisión de AOX, proceso kraft	93
4.22	Emisión media de AOX y su remoción mediante lodos activados	93
4.23	Porcentajes de remoción para AOX en sistemas de tratamiento biológicos	93
4.24	Consideraciones para la estimación del indicador AOX	94
4.25	Intervalos y valores promedio para ácidos resinosos clorados	94
4.26	Consideraciones para la estimación de ácidos resinosos clorados	95
4.27	Emisión media de cloroformo, proceso kraft	96
4.28	Consideraciones para la estimación de cloroformo	97
4.29	Emisión promedio de metales pesados, industria de la celulosa y papel	98
4.30	Consideraciones para la estimación metales pesados y PCP	99
<hr/>		
5.1	Plantas productoras de celulosa y papel en México	100
5.2	Producción de celulosa en México (1999)	101
5.3	Distribución de la manufactura de celulosa química (1999)	101
5.4	Consumo de fibras secundarias en México (1999)	102
5.5	Producción de papel por grupos y entidades federativas (1999)	103
5.6	Posibles escenarios para las industrias de celulosa y papel mexicanas	104
5.7	Consideraciones para la estimación de emisiones	104
5.8	Cálculo de emisiones al agua de ácidos resinosos	105
5.9	Distribución de la emisión de ácidos resinosos	106
5.10	Cálculo de emisiones al agua de ácidos grasos	106
5.11	Cálculo de emisiones al agua de dioxinas y furanos	107
5.12	Cálculo de emisiones al agua de compuestos fenólicos clorados	107
5.13	Cálculo de emisiones al agua del indicador AOX	108
5.14	Cálculo de emisiones al agua de ácidos resinosos clorados	108
5.15	Cálculo de emisiones al agua de cloroformo	109
5.16	Volumen de agua utilizado en la producción de papel	109
5.17	Cálculo de emisiones al agua de metales pesados	109
5.18	Cálculo de emisiones al agua de pentaclorofenol	110
5.19	Emisiones al agua por la producción de celulosa y papel en México	113

Índice de figuras

2.1	Emisiones en sitio en América del Norte: estados y provincias	26
2.2	Flujo de información dentro del RETC y las fuentes consideradas	28
2.3	Árbol de decisión para la elección del método de estimación	31
3.1	Extracción y principales usos de agua en México, 1995	39
3.2	Pirámide del reciclaje de papel	42
3.3	Distribución de la producción de papel en México	46
3.4	Fabricación de celulosa	47
3.5	Recuperación de químicos (continuación del proceso de fabricación de celulosa)	52
3.6	Fabricación de papel	55
3.7	Administración y servicios auxiliares	58
5.1	Emisión al agua de ácidos resinosos	110
5.2	Emisión al agua de ácidos grasos, dioxinas y furanos, y cloroformo	111
5.3	Emisión al agua de compuestos fenólicos clorados, compuestos organoclorados medidos como AOX y ácidos resinosos clorados	111
5.4	Emisión al agua de metales pesados y pentaclorofenol	112
5.5	Emisión total al agua sin el indicador AOX	115
5.6	Emisión total al agua considerando el indicador AOX	115

El modelo de desarrollo mexicano ha experimentado una serie de transformaciones en las últimas décadas, evolucionando de una economía basada en la actividad agrícola, a otra con predominancia en los servicios. En el período de transición, el sector industrial ha tenido un carácter protagónico dominando el rumbo de la economía por más de medio siglo.

El proceso de industrialización de México se origina en la década de los cuarenta, catalizado por la escasez de productos manufacturados a causa de la Segunda Guerra Mundial. A partir de entonces la estrategia de crecimiento se orienta al fomento de la industria, generación de riqueza y satisfacción de las necesidades poblacionales, sin considerar el deterioro ambiental ocasionado durante su consecución. Aunado a ello, la política de precios bajos en energéticos y la falta de una planeación estratégica de largo plazo que contemplara la modernización de los procesos industriales, configuraron el escenario para un rápido crecimiento de los índices de contaminación en México.

La preocupación de los países industrializados por el creciente deterioro ambiental, manifestada a finales de la década de los sesenta, tuvo repercusión en México en 1970 cuando se comenzaron a manejar los primeros criterios ambientales para el desarrollo. A partir de entonces la política ambiental mexicana ha estado regida por las tendencias de administración predominantes en el mundo, que se sintetizan en el logro de un desarrollo sustentable.

Este modelo de crecimiento, definido por el informe Brundtland¹ como *"aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias"*, es contemplado durante la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro en 1992. En dicha reunión se establecen los principios generales que sustentan la estrategia común para la conservación de los recursos naturales y el mejoramiento de la calidad ambiental, quedando definidas las acciones y metas para que los países avancen mediante este desarrollo.

Uno de estos principios, el que establece el derecho a la información, reconoce que cada sociedad debe decidir que riesgos ambientales considera excesivos o inaceptables, definiendo en consecuencia sus marcos normativos y de gestión ambiental; sin embargo, también advierte una carencia de información en todos los niveles, desde los planos nacional e internacional, hasta el comunitario e individual.

Para superar esta situación y asegurar que la toma de decisiones se base en información fidedigna, se plantean dos objetivos primordiales: reducir las diferencias entre países en materia de datos y mejorar el acceso a la información.

¹ Informe de la Comisión de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Desarrollo de 1987.

El logro de estos objetivos se ha planteado mediante la implementación de registros de emisiones contaminantes a escala nacional y regional, que apoyen la toma de decisiones, el desarrollo y establecimiento de objetivos y prioridades en la administración ambiental, así como la evaluación de su desempeño, a partir del ejercicio del derecho a la información.

1.1 Antecedentes

En 1994 se inicia la instrumentación técnica, administrativa y jurídica del registro de emisiones de México, emitiéndose en marzo de 1997 la Propuesta Ejecutiva Nacional (INE-SEMARNAP, 1997) para el desarrollo de los elementos necesarios tendientes a establecer un inventario computarizado con los datos anuales de descargas, emisiones y transferencia de contaminantes al aire, agua y suelo; detallados por especie química, tipo de establecimiento, sector económico y región geográfica.

El RETC (Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes) comenzó a integrarse en 1998 con datos del año previo, requiriendo información sobre 178 sustancias emitidas por 8 categorías de fuentes. Sin embargo, los resultados expresados en el primer informe (INE, 1999) muestran los numerosos problemas de instrumentación con los que aún cuenta el registro, que se resumen en la falta de información concerniente a las emisiones de las sustancias listadas.

Estudios realizados en industrias mexicanas han podido establecer tres factores que ocasionan esta situación: el carácter voluntario del reporte de las sustancias listadas, la falta de personal calificado para la determinación de las emisiones y la escasa utilización de técnicas de estimación indirecta.

Este entorno ha originado que la integración del RETC tenga que ser apoyada con información de otras bases de datos como el Inventario Nacional de Descargas de Aguas Residuales, INDAR, que recopila lo relacionado al uso de agua y descarga de agua residual. Sin embargo, dichos registros también presentan deficiencias en su funcionamiento por el escaso o incorrecto reporte de emisiones.

En este contexto, el uso de métodos de estimación indirecta para el cálculo de emisiones contaminantes al agua, a pesar de estar normada su medición, podría constituirse como un elemento que mejore la calidad de la información contenida en el RETC. Por otra parte, es importante establecer métodos indirectos de estimación para las sustancias incluidas en el RETC, ya que hasta el momento su reporte es de carácter voluntario y no todas las fuentes de emisión son requeridas de reporte directo.

Estos aspectos fundamentan el presente estudio, en el que se trata de establecer una metodología para la estimación indirecta de emisiones contaminantes al agua, por parte del sector industrial. Para ejemplificar el procedimiento se elegirá un subsector industrial; no obstante, la metodología de estimación desarrollada servirá como modelo para instrumentar otras, aplicables a giros industriales específicos.

La metodología de estimación se desarrolla a partir del capítulo 3, luego de establecer en el capítulo 2 la situación de los registros de emisiones contaminantes en Norteamérica y analizar los métodos de estimación indirecta disponibles, en el cual se define el subsector industrial que será empleado como caso de estudio. Una vez definido éste, se describe su proceso de manera sistémica; es decir,

se establecen los elementos (actividades y equipos), entradas (insumos directos e indirectos, energía y agua) y salidas (emisiones y transferencias al agua, aire y suelo) que deben ser considerados para la estimación de emisiones. Además, se determinan las relaciones entre los elementos del sistema (proceso productivo) y se definen los puntos de emisión y hacia qué medio los contaminantes están siendo emitidos.

En el capítulo 4 se identifican las sustancias contaminantes asociadas a cada punto de emisión, determinándose las emisiones que deben ser estimadas. Una vez definidas éstas, se procede a seleccionar el método de estimación apropiado y finalmente se realiza en el capítulo 5, a manera de ejemplo de aplicación de la metodología propuesta, la estimación de emisiones a escala nacional de las sustancias consideradas.

Dado lo anterior, el presente estudio tiene por objetivo, alcances y premisas los que se describen a continuación.

1.2 Objetivo

Establecer una metodología para la estimación indirecta de las emisiones contaminantes al agua, generadas por el proceso productivo de celulosa tipo kraft y papel en México.

El logro de este objetivo requirió de las siguientes actividades:

- ♦ Revisión de las tendencias de administración ambiental en el ámbito internacional y nacional
- ♦ Análisis de los inventarios de emisiones contaminantes establecidos en América del Norte
- ♦ Evaluación del desempeño del RETC y de sus fuentes de información en materia de emisiones al agua
- ♦ Revisión de los métodos de estimación indirecta disponibles
- ♦ Estudio detallado del proceso productivo utilizado en la fabricación de celulosa tipo kraft y papel
- ♦ Determinación de las sustancias contaminantes a estimar
- ♦ Compilación y selección de métodos de estimación aplicables a las sustancias definidas
- ♦ Identificación de la información necesaria y factores de aplicabilidad para estimar las emisiones contaminantes identificadas
- ♦ Finalmente, estimación de emisiones a escala nacional mediante la metodología propuesta

El resultado de estas actividades se presenta en los capítulos siguientes.

1.3 Alcances

Los alcances establecidos para este trabajo son:

- ♦ Analizar las tendencias de administración ambiental predominantes en el ámbito internacional y nacional, destacando la importancia de la obtención de información dentro de éstas

- ♦ Examinar la situación de los inventarios de emisiones instaurados en América del Norte y particularmente el registro mexicano, estableciendo la conveniencia de implantar metodologías de estimación indirecta para la determinación de emisiones contaminantes al agua
- ♦ Estudiar la situación de los principales sectores industriales de México para determinar las fuentes generadoras de agua residual con elevadas concentraciones de contaminantes y, con base en ello, definir el subsector industrial de estudio
- ♦ Identificar las emisiones contaminantes a estimar, analizando el proceso más utilizado dentro del subsector industrial seleccionado, elaborando los diagramas de operación y funcionamiento, y revisando la normatividad existente para este proceso productivo en el ámbito nacional e internacional
- ♦ Una vez definidas las sustancias a estimar, seleccionar los métodos de estimación indirecta aplicables
- ♦ Como ejemplo de aplicación de la metodología propuesta, realizar la estimación de emisiones a escala nacional, para el giro industrial seleccionado
- ♦ Analizar los resultados del ejemplo de aplicación para determinar la importancia ambiental del subsector industrial

Premisas

Las principales limitaciones de este trabajo se enfrentaron al aplicar la metodología propuesta a la industria particular seleccionada como ejemplo, industria de celulosa y papel, siendo resultado de la escasa información y recursos disponibles:

- ♦ Para la determinación de las ecuaciones de estimación se buscó utilizar valores de emisión con elevados factores de aplicabilidad; sin embargo, en algunos casos esto no fue posible debido a la carencia de datos
- ♦ La complejidad del proceso analizado ocasiona que las emisiones generadas dentro de éste dependan de múltiples factores, la carencia de información limitó su inclusión en las expresiones de estimación
- ♦ A pesar de lo anterior, la mayor limitante de este trabajo se presentó en el cálculo de las emisiones a escala nacional, ya que se cuenta con escasa información referente a la industria de la celulosa y papel en México

A partir de la década de los setenta la comunidad internacional señaló con preocupación las tendencias de agotamiento y continua degradación de los recursos naturales, recomendando la adopción de enfoques integrales para su administración y manejo, así como la aplicación de mecanismos económicos para incidir en su aprovechamiento racional. Sin embargo, la crisis financiera de los ochenta impuso severas restricciones a la instrumentación de dichas propuestas.

El informe Brundtland de la Comisión de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Desarrollo de 1987, advierte un notable incremento en la degradación ambiental, producto de las erróneas estrategias de desarrollo. Surge entonces la necesidad de aportar soluciones que engloben simultáneamente: eficiencia económica, desarrollo social y sustentabilidad ambiental; factores que constituyen un conjunto que interactúa y mantiene objetivos complementarios, que se resumen en una nueva forma de crecimiento.

Aparece así el concepto de desarrollo sustentable, definido como el manejo de los recursos naturales y la orientación del cambio tecnológico e institucional, de tal manera que asegure la continua satisfacción de las necesidades humanas para las generaciones presentes y futuras. Este desarrollo debe minimizar la degradación del ambiente, ser económicamente viable, técnicamente factible y socialmente aceptable.

2.1 Política y administración ambiental en México

Los primeros intentos que se dieron en México para establecer regulaciones tendientes al uso adecuado de los recursos naturales, tienen origen en la Ley de Conservación del Suelo y Agua en 1940 (Vizcaino, 1975). A partir de entonces ha existido una sucesión de leyes que, en materia ambiental, han impulsado la evolución política e institucional del país y que hoy en día tienen como centro de coordinación la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Enseguida se presenta una síntesis que muestra la evolución cronológica de la legislación e instituciones ambientales de México (UAM, 1997).

- ♦ **1940** Aprobación de la Ley de Conservación del Suelo y Agua.
- ♦ **1971** Aprobación de la Ley para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental.
- ♦ **1973** Creación de la Subsecretaría para el Mejoramiento del Medio Ambiente.
- ♦ **1980** Reformas a la Constitución Política Nacional, donde se incluyen leyes para fortalecer la legislación ambiental.
- ♦ **1982** Instauración de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), y la Ley Federal de Protección al Ambiente.

- ♦ **1987** Modificación de la Constitución Política Nacional, incorporando facultades al Estado a fin de preservar y restaurar el equilibrio ecológico.
- ♦ **1988** Se emite la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente (LGEEPA).
- ♦ **1989** El Plan Nacional de Desarrollo 1989–1994 incluye modificaciones en la estructura institucional, creando organismos con autonomía técnica y operativa en busca de mejorar el tratamiento de los problemas ambientales.
- ♦ **1989** Fundación de la Comisión Nacional del Agua.
- ♦ **1992** Se transforma la SEDUE en la Secretaría de Desarrollo Social, otorgándole autoridad para desplegar una política de desarrollo social relacionada con los aspectos ecológicos.
- ♦ **1994** Se conforma la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), como máxima autoridad de la administración de los recursos naturales y protección al ambiente.
- ♦ **1995** El Plan Nacional de Desarrollo 1995–2000 contempla los acuerdos firmados en la Conferencia de Río.
- ♦ **1996** Modificación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente.
- ♦ **2000** Se transforma la SEMARNAP en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

La política ambiental mexicana ha pasado por diversas etapas, atendiendo los aspectos ambientales desde distintos enfoques: como un problema de salud pública, de ecología y, finalmente, como un problema ambiental.

Hasta 1982 la contaminación fue concebida por el Estado como un asunto de salud pública. Con este enfoque, la estrategia ambiental se dirigió al abatimiento de los humos y polvos, pues sus resultados podían parecer ante la sociedad como "avances" en el combate de la contaminación, evadiéndose el control de otras emisiones potencialmente peligrosas (Vizcaino, 1975). De 1982 a 1995 la estrategia se orienta a normar y vigilar el uso racional de los recursos naturales, concentrándose en la planificación económica que, de acuerdo al caso, especificaría la relevancia del factor ambiental en la toma de decisiones. A partir de entonces se considera que la política ambiental mexicana inicia su desarrollo de manera integral, es decir, ahora se trata no sólo de una medida para solucionar un problema de salud pública (Godav, 1995).

En 1995 se inicia la etapa de gestión ambiental, incorporándose por primera ocasión el concepto de desarrollo sustentable en la planificación nacional. Como un primer paso para alcanzar este crecimiento, el Plan Nacional de Desarrollo 1995–2000 contempla una estrategia para contener el deterioro del medio y reducir el uso irracional de los recursos naturales.

Esta tendencia de administración ambiental se originó en la Conferencia de Río de Janeiro, de la que surgió el documento conocido como Agenda 21. Dicho manifiesto establece, como plan de acción de los 178 países firmantes, los principios generales que sustentan la estrategia común para la conservación de los recursos naturales y el mejoramiento de la calidad ambiental.

Uno de esos principios señala que: *"La mejor vía para tratar los aspectos ambientales se alcanza con la participación de todos los ciudadanos interesados, en el nivel que corresponda. En el plano nacional, toda persona deberá tener acceso a la información ambiental de que dispongan las"*

autoridades, incluida aquella sobre materiales y actividades que encierren peligro en sus comunidades, así como la oportunidad de participar en el proceso de toma de decisión" (SEMARNAP, 2000).

Este principio, que establece el derecho a la información, se ha reflejado en las acciones de algunas instituciones internacionales como la Organización de Cooperación para el Desarrollo Económico (OCDE) y la Comisión para la Cooperación Ambiental en América del Norte (CCA), las cuales han promovido la creación de registros regionales de emisiones contaminantes, accesibles a toda la población.

En este contexto, una de las metas de la administración ambiental de México es el desarrollo del Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). El SINIA deberá responder, tanto a las necesidades de información interna para fortalecer a los funcionarios públicos en el proceso de toma de decisión, como a orientar y robustecer la participación pública a partir del ejercicio del derecho a la información.

Como parte del SINIA, en materia de emisiones, se planteó en 1994 la implementación del registro de emisiones de México, como un instrumento que permita mantener una base de datos de las emisiones y transferencia de sustancias contaminantes, así como la ubicación geográfica y datos de las fuentes de emisión.

2.2 Registros de emisiones

Los PRTR¹ son inventarios de las emisiones de sustancias que contaminan los distintos medios (agua, aire o suelo) y de las transferencias de dichos compuestos para su tratamiento o eliminación. La información recopilada en estos registros se encuentra detallada por especie química, tipo de establecimiento, sector económico y región geográfica. Cabe mencionar que cada país elabora la lista de sustancias sujetas a registro, de acuerdo con sus condiciones locales, evaluaciones científicas y sustancias que se comercializan comúnmente dentro de su territorio.

Los inventarios de emisiones constituyen una herramienta que se puede emplear con diversos propósitos. En general, al seguir de cerca las sustancias ambientalmente preocupantes ayuda a la industria, gobiernos y ciudadanos, a identificar maneras de reducir la generación y emisión de contaminantes, controlar las transferencias de éstos y asumir la responsabilidad por el uso de sustancias potencialmente peligrosas (CCA, 2000).

En el pasado han existido algunas bases de datos con información ambiental; no obstante, los PRTR se diferencian de éstas por contar con las siguientes características:

- ♦ El registro se realiza al nivel de sustancia
- ♦ Se considera todos los medios ambientales
- ♦ Su contenido se publica periódicamente

¹ Del inglés: Pollutant Release and Transfer Registers

Como se ha mencionado, la Conferencia de Río fue el punto de partida para el establecimiento de los PRTR a escala mundial. Los países firmantes acordaron que estos registros deberían implementarse antes del año 2000; con este propósito, el UNITAR² inició proyectos piloto en la República Checa, Egipto y México, para adquirir experiencia en cuanto a los retos y oportunidades asociados al establecimiento de estos sistemas en países en vías de desarrollo (UNITAR, 1997).

Para la conformación del PRTR de México se consideró la experiencia internacional. En América del Norte se tenían en operación el Inventario de Emisiones Tóxicas (TRI³) de Estados Unidos y el Inventario Nacional de Emisiones Contaminantes (NPRI⁴) de Canadá; además, se contaba con la práctica de otros de países como Holanda, Inglaterra y Suecia (INE, 1999).

2.2.1 Panorama general de los PRTR de América del Norte

La primera base de datos de América del Norte fue el TRI de Estados Unidos, que comenzó a recoger información en 1987. Las industrias de Canadá informaron de sus emisiones y transferencias al NPRI por primera vez en 1993. México concluyó con éxito en 1996 el estudio de caso para demostrar su propuesta de inventario que, con el nombre de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), comenzó a integrarse en 1998 con datos del año previo.

Inventario de Emisiones Tóxicas de Estados Unidos (TRI)

El TRI fue creado en 1987 conforme a la Ley de Planeación de Emergencias y Derecho de Información de la Comunidad (EPCRA⁵), luego del accidente fatal de emisiones químicas en una planta estadounidense localizada en Bhopal, India. El registro original listaba más de 300 sustancias y 20 categorías⁶, abarcando a las industrias del sector manufacturero (USEPA, 2000a).

Desde entonces ha experimentado cambios significativos como la incorporación de 286 sustancias, para el año de reporte de 1995, y la ampliación de los subsectores industriales que deben informar emisiones (1998). Originalmente, sólo las industrias del sector manufacturero debían reportar sus emisiones al inventario, las ampliaciones realizadas abarcaron a los establecimientos federales (1994) y siete nuevos subsectores industriales (1998).

Actualmente este registro engloba cerca de 600 sustancias, 28 categorías químicas y siete nuevos subsectores industriales: minería metálica, minería de carbón, generadoras de electricidad, terminales de almacenamiento de petróleo, distribuidores de productos químicos, plantas de manejo de residuos peligrosos y establecimientos de recuperación de disolventes (USEPA, 2000a).

² Del inglés: United Nations Institute for Training and Research

³ Del inglés: Toxics Release Inventory

⁴ Del inglés: National Pollutant Release Inventory

⁵ Del inglés: Emergency Planning and Community Right-to-Know Act (1986)

⁶ Grupos de productos químicos estrechamente relacionados.

Inventario Nacional de Emisiones Contaminantes de Canadá (NPRI)

El inventario de Canadá fue creado en 1992, siendo 1993 su primer año de reporte. El NPRI requiere información de las emisiones contaminantes en sitio y la transferencia de residuos para tratamiento, disposición y reciclaje. En este registro se utiliza un criterio distinto para definir las industrias que deben reportar emisiones. En general, cualquier industria puede ser solicitada para presentar informes si el número de horas laboradas es de 20 000 o más durante el año calendario, y la cantidad de sustancias producidas, procesadas o manejadas (enlistadas en el NPRI), durante el mismo periodo es de 10 toneladas ó 1% en peso del producto final (CEPA, 1999).

En el primer año de funcionamiento el NPRI solicitaba información sobre 178 sustancias y 14 categorías. Las consultas permanentes con los grupos de interés han modificado los requisitos de información; con base en sus recomendaciones, en 1999 Environment Canada adicionó 73 compuestos, conformando una lista de 246 sustancias de preocupación (CCA, 2000).

Se ha mencionado que uno de los objetivos de la CCA, en términos del Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte, radica en crear el NAPRI⁷. En este contexto, los esfuerzos de los tres países, coordinados por dicho organismo, se han concentrado en homogeneizar la información contenida en sus inventarios para favorecer la integración del registro conjunto. No obstante, el último informe emitido (mayo de 2000) no incluye aún datos de México.

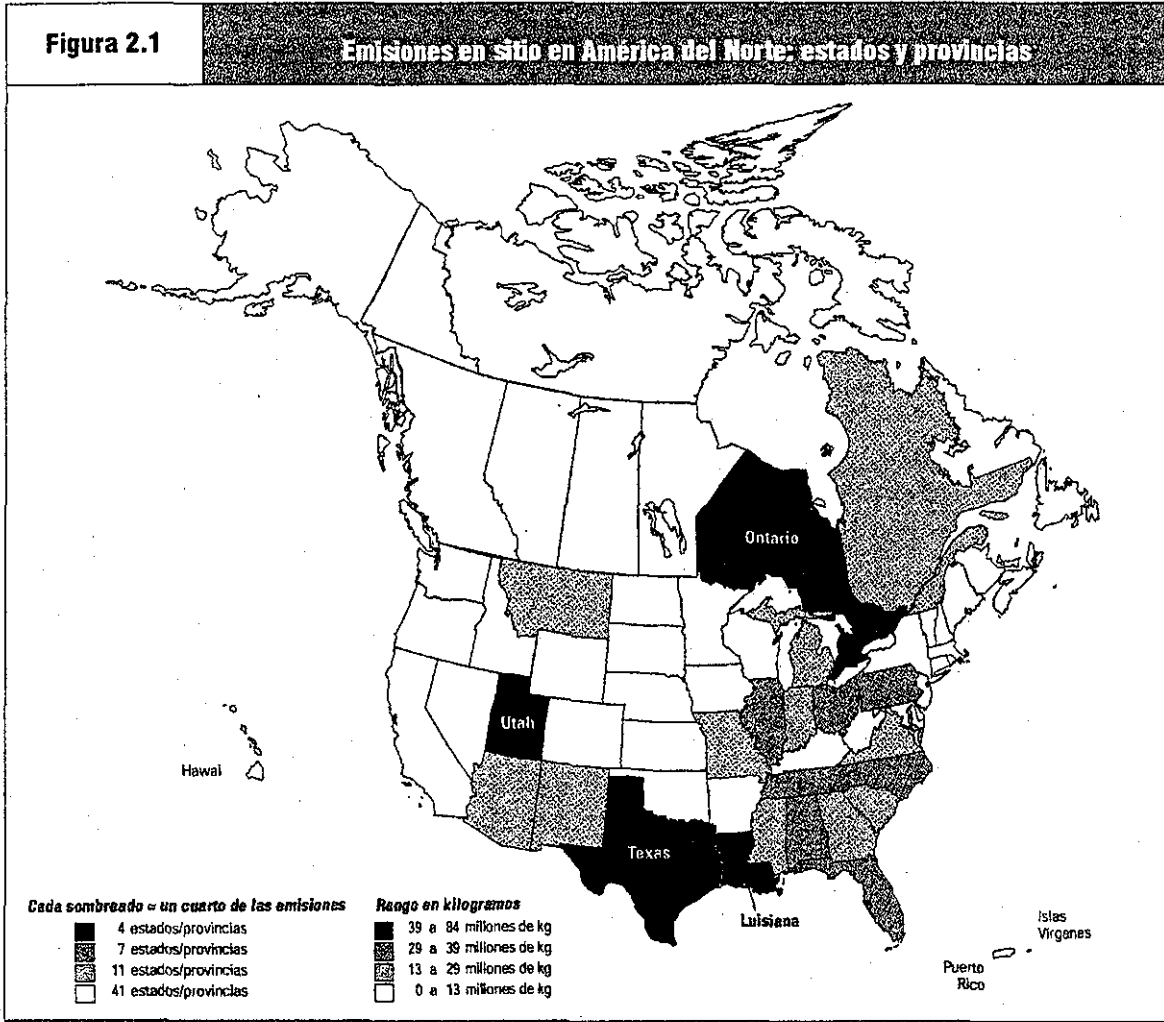
Registro de Emisiones Contaminantes de Norte América (NAPRI)

La información de los registros de Estados Unidos y Canadá se ha integrado en lo que se pretende constituya el inventario de emisiones contaminantes de Norte América. La información es conjuntada y publicada por la CCA, siendo el último informe el publicado en el 2000 con datos recabados en el periodo comprendido entre 1995 y 1997. En dicho documento se presentan los hallazgos obtenidos al integrar la información de ambos registros, mismos que a continuación se sintetizan.

- ♦ En 1997 las plantas de Estados Unidos y Canadá emitieron 847.8 millones de kg de las sustancias listadas en el TRI y el NPRI.
- ♦ Las emisiones totales disminuyeron en un 9 por ciento de 1995 a 1997. Las industrias incluidas en el NPRI redujeron sus emisiones en 13 por ciento; la baja de las del TRI fue de 8 por ciento.
- ♦ Las plantas canadienses representan el 7 por ciento del conjunto combinado de datos de 1997, pero contribuyeron con casi 10 por ciento de las emisiones. Con 93% de las industrias de la región, las plantas del TRI representaron casi 91% de las emisiones en sitio.
- ♦ Las industrias que registraron las mayores emisiones fueron las mismas en ambos registros, pero no necesariamente en el mismo orden. La industria metálica básica informó las mayores emisiones del NPRI, seguida de la química y la papelera. En el TRI, la manufactura de productos químicos figuró en primer lugar, seguida de metálica básica y productos de papel.

⁷ Del inglés: North America Pollutant Release Inventory

Además, este registro ha podido determinar que más de una cuarta parte de todas las emisiones del conjunto combinado de datos se originó en cuatro estados y provincias: Texas, Luisiana, Utah y Ontario (figura 2.1).



FUENTE: CCA, 2000.

2.2.2 Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de México (RETC)

México inició el proyecto piloto RETC en mayo de 1994, con el objetivo de establecer un inventario sobre la emisión y transferencia de contaminantes a los distintos medios, que apoyara la toma de decisiones y el desarrollo de políticas ambientales. Para ello se planteó un esquema, similar al de registros establecidos en el mundo y particularmente en América del Norte, que integrara fuentes industriales y otros sectores relevantes en la contaminación ambiental, como agricultura y servicios urbanos (INE, 1999). El primer ciclo de reporte se realizó en 1997, contando con un listado de 178 sustancias.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para la integración de la lista de sustancias se consideraron tres fuentes de información: las Normas Oficiales Mexicanas, la lista de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático y los listados de registros equivalentes al RETC operados en otros países, en particular los de Canadá, Estados Unidos, Suecia (Swedish Sunset Project) y el Hazardous Air Pollutants Inventory de los países miembros de la OCDE (SEMARNAP, 1999).

La lista resultante, 409 sustancias, se depuró siguiendo los criterios de toxicidad, persistencia ambiental y bioacumulación, tomados del sistema de evaluación de contaminantes ambientales de la provincia de Ontario, Canadá (sistema MOE), lográndose la lista final de 178 sustancias.

En la conformación de un inventario de emisiones, además de las sustancias a reportar, es indispensable considerar todos los tipos de fuentes de emisión. El RETC incluye fuentes puntuales y no puntuales.

De acuerdo con la LGEEPA (SEMARNAP, 1997b), se consideran fuentes fijas de jurisdicción federal, en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera, las industrias: química; del petróleo y petroquímica; de pinturas y tintas; automotriz; de celulosa y papel; metalúrgica; del vidrio; de generación de energía eléctrica; del asbesto; cementera y calera; y el tratamiento de residuos peligrosos.

Las fuentes no puntuales son aquellas que incluyen una o varias fuentes fijas o móviles distribuidas en un área determinada, cuyas contribuciones particulares, a diferencia de las fuentes puntuales, no pueden identificarse y evaluarse en forma precisa. Algunas de estas fuentes consisten en una colección de pequeñas actividades individuales, que por razones prácticas no pueden ser tratadas como fuentes puntuales de emisión (INE, 2000c).

Las fuentes incluidas en el RETC se clasifican en las siguientes 8 categorías:

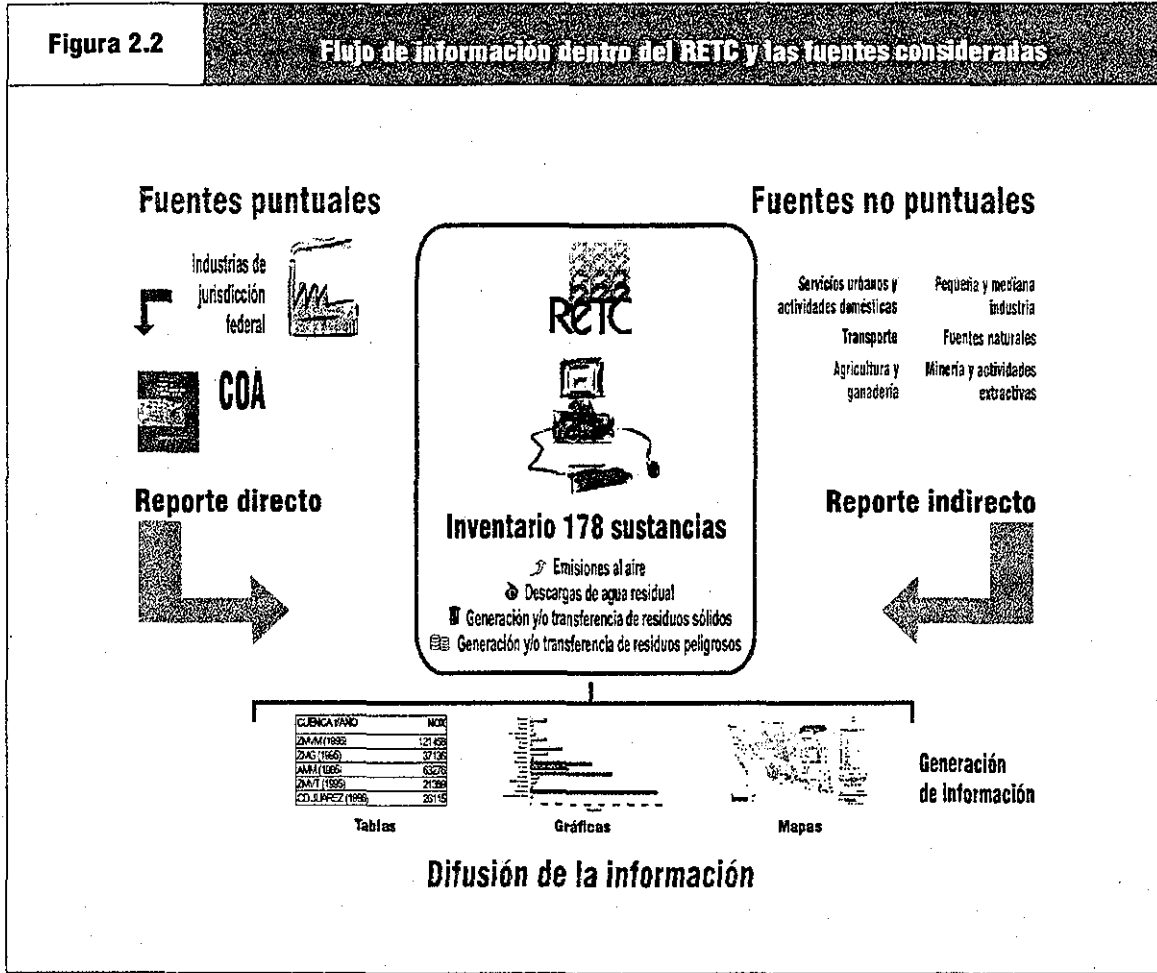
Fuentes puntuales

- ♦ Fuentes fijas de jurisdicción federal
- ♦ Industrias de jurisdicción estatal

Fuentes no puntuales

- ♦ Servicios urbanos, actividades domésticas y productos de consumo
- ♦ Transporte
- ♦ Agricultura y ganadería
- ♦ Pequeña, mediana industria y establecimientos comerciales
- ♦ Minería y actividades extractivas
- ♦ Fuentes naturales

La información que contiene el RETC, en lo concerniente a las fuentes fijas, se integra por medio de la Cédula de Operación Anual (COA). Por otro lado, las emisiones provenientes de las fuentes no puntuales se determinan mediante métodos indirectos de estimación. El flujo de información hacia y desde el RETC, se puede observar en la figura 2.2.



FUENTE: Adaptación libre de INE, 1999.

Actualmente se cuenta con un informe oficial relativo al funcionamiento de RETC (ciclo de reporte 1997–1998); sin embargo, dicho documento refleja los numerosos problemas de instrumentación con los que todavía cuenta el registro mexicano. En este informe se enumeran los factores que dificultaron la integración de los reportes recibidos, que dieron como resultado que de 2,653 formatos presentados, sólo 1,129 se procesaran para integrar la base de datos. Esta situación fue ocasionada por la utilización de formatos obsoletos (LF-CO⁸), la poca difusión del nuevo formato y la deficiente o escasa información contenida en los reportes presentados (INE, 1999).

⁸ Formato de Licencia de Funcionamiento y Cédula de Operación.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Consecuentemente, la elaboración del inventario de emisiones ha tenido que sustentarse en otras fuentes de información como las redes de monitoreo ambiental, los registros de residuos peligrosos y el inventario de la Comisión Nacional del Agua.

2.3 Inventario Nacional de Descargas de Aguas Residuales (INDAR)

La elaboración del INDAR corre a cargo de la Comisión Nacional del Agua, tiene por objetivo recabar y analizar información referente a la calidad y cantidad de las descargas a cuerpos de agua y bienes nacionales, para asegurar el mejor diseño de las estrategias, toma de decisiones y control de las descargas y usuarios.

De acuerdo con el último informe, para septiembre del año 2000 se detectaron un total de 16,157 usuarios con 28,096 descargas. En lo que toca al uso industrial, se contabilizaron 13,702 usuarios con 19,752 descargas, que emitieron en conjunto un gasto de 170 m³/s (CNA, 2000).

Además de cuantificar el uso de agua, el inventario pretende enumerar las descargas por intervalo de carga contaminante, medida como DBO₅, con el objetivo de determinar el monto total descargado en cualquier zona de interés, definiéndose tres categorías:

- ♦ Descargas que emiten más de 3 toneladas por día
- ♦ Descargas que emiten de 1.2 a 3 toneladas por día
- ♦ Descargas que emiten menos de 1.2 toneladas por día

Sin embargo, hasta el momento no se cuenta con suficientes datos de las fuentes de emisión, por lo que se pretende obtener la información faltante a través de estimación indirecta, a partir de promedios ponderados de 16 parámetros obtenidos de datos reales de 871 descargas representativas, pertenecientes a los principales giros industriales del país.

Mediante esta metodología se determinó que 301 usuarios con 509 descargas se ubican en la primera categoría, contabilizando un gasto de 151.46 m³/s, lo cual corresponde a 89% del gasto generado por usuarios no municipales (CNA, 2000). En el cuadro 2.1 se pueden observar los resultados obtenidos.

Carga (t/d)	Descarga de agua residual no municipal, por categoría de carga contaminante			
	No. de usuarios	No. de descargas	Descarga (m ³ /s)	%
Mayor de 3.0	301	509	151.46	89
Entre 1.2 y 3.0	182	268	6.76	4
Menor de 1.2	13,219	18,975	11.64	7
Total	13,702	19,752	169.88	100

t/d = toneladas de materia orgánica medida como DBO₅ / día; m³/s = metros cúbicos de agua residual / segundo
 FUENTE: CNA, 2000.

Con estos resultados se ha podido concluir que el control inmediato de los 301 usuarios no municipales que generan más de 3 t/d, permitirá auditar alrededor del 80% de la contaminación emitida a cuerpos de agua y bienes de propiedad nacional (CNA, 2000).

Los inventarios mexicanos no han logrado ofrecer grandes resultados hasta el momento, en la mayoría de los casos por el incorrecto o incompleto reporte de emisiones contaminantes. Esta situación refleja los resultados obtenidos mediante el formato de reporte COA.

2.4 Cédula de Operación Anual (COA)

La COA es el mecanismo de reporte anual relativo a emisiones, manejo y transferencia de contaminantes, deriva de las obligaciones fijadas en la LAU (Licencia Ambiental Única) (INE, 2000b). Las empresas que deben reportar mediante este formato son todas aquellas de jurisdicción federal, mismas que fueron definidas en párrafos anteriores.

El objetivo de la COA es obtener información de las industrias sobre:

- ♦ La cantidad de emisiones de sustancias contaminantes a los diferentes medios (aire, agua, suelo)
- ♦ La cantidad de transferencias de tales sustancias fuera del establecimiento, ya sea para su tratamiento, reciclaje, reuso y/o disposición final
- ♦ Las actividades de control, prevención de la contaminación y proyección de volúmenes de contaminación para el siguiente periodo de reporte
- ♦ Información sobre métodos de tratamiento in situ

Existen dos alternativas para determinar emisiones: medición directa o estimación mediante métodos indirectos. En la determinación de emisiones la medición directa siempre será preferible; sin embargo, en muchas ocasiones no es posible realizarla por lo que se debe recurrir a los métodos indirectos. Estas técnicas representan una alternativa viable para determinar las emisiones contaminantes; sin embargo, su aplicación ha sido limitada a pesar de las ventajas que pueden significar para el llenado de la COA.

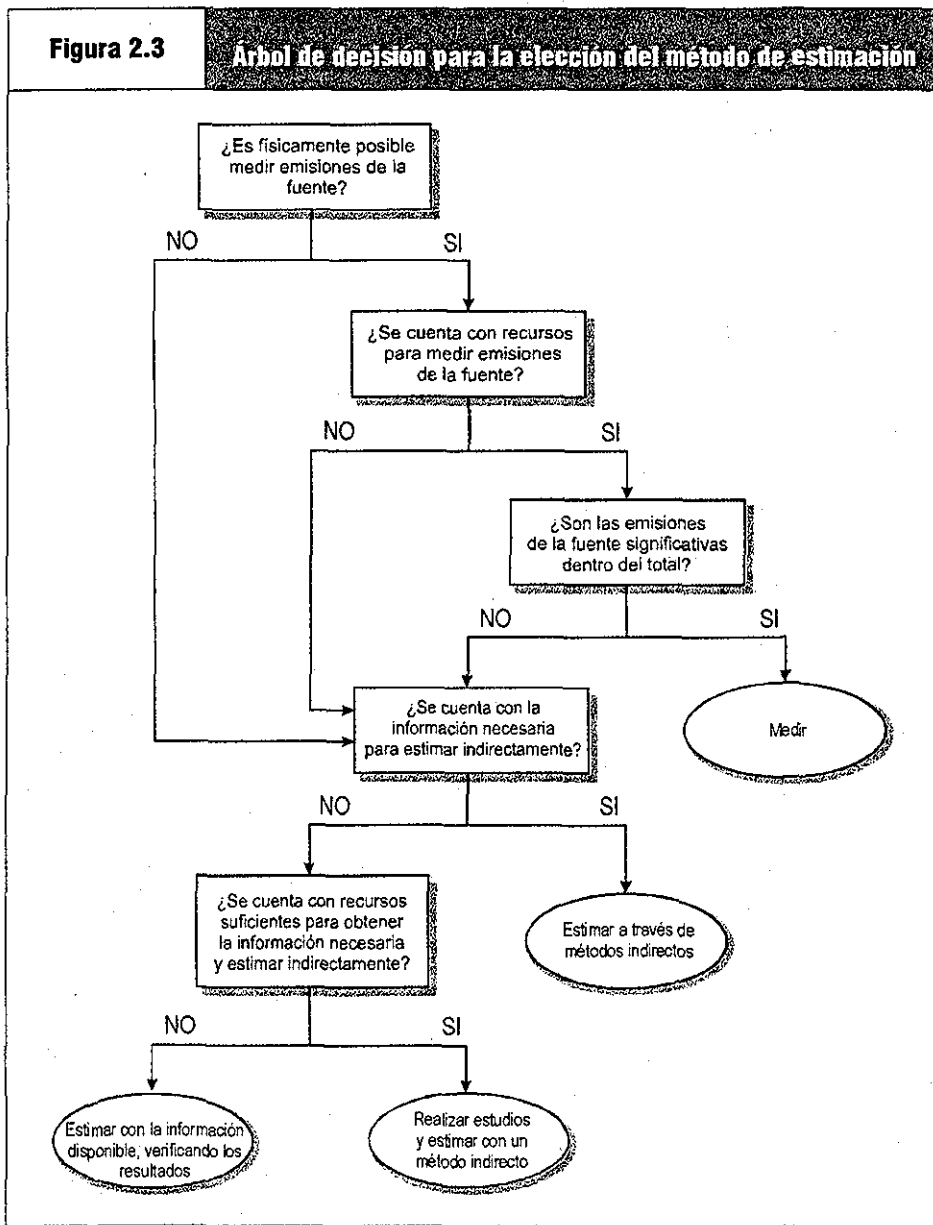
En el formato COA se indica que el cálculo de las emisiones de sustancias para las cuales existan normas mexicanas específicas, se realizará conforme métodos de medición directa; en tanto que la determinación de la emisión para aquellas que no cuenten con norma, o se emitan a un medio distinto al señalado, se podrá realizar por el método de estimación que la industria considere el más adecuado (INE, 1999).

Estudios realizados en industrias mexicanas han constatado el uso reducido de factores de emisión y otros métodos de estimación indirecta. Esta situación subsiste porque en México todavía no se adoptan oficialmente dichos métodos, a pesar de que éstos existen para numerosos procesos y equipos, y porque la mayoría de los técnicos que participan en el establecimiento de inventarios de emisiones consideran la medición directa como la única opción confiable (TUV Latinoamérica, 1999).

A pesar de ello, considerando la situación en que se encuentra el inventario de emisiones de México, se puede afirmar que el uso de técnicas de estimación indirecta puede representar una opción asequible para la determinación de la información faltante. Enseguida se presenta una síntesis de los métodos de estimación indirecta existentes y sus características.

2.5 Métodos indirectos para la estimación de emisiones contaminantes

En la figura 2.3 se muestra el proceso de toma de decisión para la elección del método de estimación.



FUENTE: D'Arcangeli-Rojas, 2000.

2.5.1 Factores de emisión

Los factores de emisión son valores estadísticos que relacionan la cantidad de un contaminante emitido al ambiente como resultado de un proceso definido, con el nivel de actividad de dicho proceso. El nivel de actividad puede estar determinado por la cantidad de materia prima consumida, la tasa de producción, la cantidad de combustible utilizado, etc. (USEPA, 1994).

Algunos factores de emisión consideran más de un parámetro asociado al nivel de actividad. Su confiabilidad aumenta de acuerdo con el número de variables y valores involucrados en su determinación. El algoritmo general para la estimación de emisiones mediante el uso de un factor de emisión es:

$$E = A * EF \left(1 - \frac{ER}{100} \right)$$

E = Emisión

A = Nivel de actividad

EF = Factor de emisión sin equipo de control

ER = Eficiencia general en la reducción de emisiones, expresada en porcentaje. Si no hay un equipo de control, ER = 0

Si el factor de emisión fue desarrollado considerando la operación de un equipo de control, se ha incorporado ya el término que representa la efectividad de dicho sistema (1-ER/100); por lo tanto, el algoritmo toma la forma:

$$E = A * EF$$

EF = Factor de emisión controlada

Se prefiere el uso de factores de emisión específicos para un tipo de industria, al uso de los factores promedio para todo un sector industrial; sin embargo, debido a los recursos e información disponibles el uso de factores específicos para un establecimiento puede no ser factible (INE, 1997).

Los factores de emisión se clasifican en dos tipos, los basados en procesos y los basados en censos. Por lo común, los primeros se utilizan para hacer estimaciones de emisiones de fuentes puntuales, combinándose a menudo con datos de actividad obtenidos con balances de materia o que han sido recopilados en inventarios previos. Por su parte, los factores de emisión basados en censos se usan principalmente para hacer estimaciones de las emisiones en fuentes de área (USEPA, 1994).

Para la elección de este método de estimación se debe considerar que:

- ♦ Los factores de emisión con frecuencia se basan en información limitada y es posible que no representen a las emisiones reales.
- ♦ Si los factores de emisión son utilizados para proyectar emisiones de fuentes nuevas, los responsables del cálculo deben revisar la literatura más reciente y especificaciones técnicas de los equipos para determinar si tales fuentes tendrían características distintas a las fuentes originales.

- Para el llenado de la COA, los factores de emisión empleados deben ser de dominio público si son de aplicación general, o haber sido desarrollados para el proceso específico que se reporta.

2.5.2 Extrapolación

La extrapolación consiste en estimar a partir de una muestra de datos, las emisiones de toda la población, industria o actividad de interés. La aplicación del método requiere, en la mayoría de los casos, la realización de un muestreo válido estadísticamente o, si éste no fuese factible, el uso cuidadoso y documentado de los datos disponibles.

La técnica se recomienda para calcular las emisiones de fuentes puntuales, como un proceso o industria específicos; pero es la menos deseable para la estimación de emisiones de una región geográfica a otra ya que no toma en cuenta de manera apropiada algunas diferencias importantes entre dos regiones y puede generar diferencias de un inventario a otro (INE, 1997).

Cuando se tienen valores de la emisión de una sustancia (composición de gases emitidos a la atmósfera, caracterización de descargas de aguas residuales o análisis CRETIB, incluyendo composición de residuos peligrosos) es posible emplear estos datos para estimar la concentración promedio de dicha sustancia en los gastos de emisión (INE, 2000a).

En general, la aplicación de este método se recomienda cuando los datos corresponden a muestras representativas o fueron obtenidos con procedimientos validados y estandarizados, y cuando las industrias o actividades sobre las cuales se extrapola pertenecen a una misma población (D'Arcangeli-Rojas, 2000).

2.5.3 Balance de materiales

El balance de materiales es el método de estimación más empleado en la industria y puede aplicarse para estimar las emisiones contaminantes de diversas categorías de fuentes. El supuesto básico es que las emisiones son iguales a la diferencia entre la cantidad de materiales que entra y la que sale como producto en un proceso.

El método puede ser utilizado cuando no hay datos disponibles de muestreos en fuente, factores de emisión u otros métodos. Es el método idóneo cuando pueden hacerse mediciones precisas sobre todos los componentes de un proceso. La técnica es aplicable de igual manera tanto a fuentes puntuales como de área. Para las fuentes puntuales se puede usar al nivel de proceso o de planta, mientras que en el caso de las fuentes de área el balance de materiales podría aplicarse a nivel local, regional o nacional (INE, 1997).

En general, se considera que el uso de un balance de masa para determinar las emisiones de un proceso es sencillo y factible; sin embargo, en muchos casos el balance de materiales no es utilizado como la técnica principal de estimación, sino que es usado para evaluar qué tan razonables son las estimaciones obtenidas mediante otros métodos.

Para su elección se debe considerar que:

- ♦ No puede ser utilizado en procesos en los que el material reacciona al elaborar los productos o en los que éste sufre cualquier otro cambio químico significativo, a menos que la cinética de reacción de dichos procesos esté bien caracterizada.
- ♦ Debido a que las emisiones son calculadas por la diferencia entre el material que entra y el que sale, un pequeño error porcentual en la estimación de entrada o salida puede generar un gran error en la emisión obtenida.
- ♦ Por lo tanto, los balances de materiales pueden ser inapropiados cuando se analiza una pequeña diferencia entre dos valores de entrada o salida relativamente grandes (INE, 1997).

2.5.4 Cálculos de ingeniería

Se llama cálculos de ingeniería a la aplicación de principios y criterios de ingeniería como: correlaciones y especificaciones de diseño (nomogramas), propiedades físicas y químicas de las sustancias, datos esperados de eficiencia, balances parciales de materiales, etc. Normalmente este método de estimación se emplea cuando las cantidades de emisión son muy pequeñas y el monitoreo directo no es recomendable (INE, 2000a).

Para el uso de esta técnica se debe considerar que:

- ♦ Su aplicación requiere del conocimiento técnico del proceso, así como el entendimiento de las reacciones que suceden dentro del mismo y
- ♦ Los nomogramas y formulación empírica deberán ser evaluados por personal técnico calificado.

2.5.5 Modelos matemáticos

Un modelo matemático es una representación de la realidad expresada en forma matemática. Esta expresión se apega más a la realidad que representa mientras mayor número de variables considere de la misma. Los modelos más precisos requieren de una gran cantidad de información, por lo que su empleo pocas veces es posible (INE, 1999).

Para la elección de modelos matemáticos se debe considerar que:

- ♦ Generalmente requieren más información que los factores de emisión.
- ♦ Los datos requeridos dependen tanto de la fuente de emisión, como del modelo seleccionado. Por ejemplo, los modelos de emisión para operaciones de tratamiento de agua residual podrían requerir tasas de gasto, concentración de contaminantes y temperatura; mientras que los modelos de emisión para tanques de almacenamiento requerirán datos sobre la capacidad del tanque, dimensiones, presión de vapor, etc.
- ♦ La exactitud de las estimaciones depende del algoritmo empleado y de la precisión de los componentes individuales utilizados en su determinación (INE, 1997).

Cada uno de los métodos antes mencionados posee ventajas y desventajas, técnicas y económicas, que la propia industria deberá considerar para su aplicación. No obstante, con base en sus características, el Instituto Nacional de Ecología (INE, 2000a) propone la siguiente jerarquización para la elección de la técnica de estimación (cuadro 2.2).

Cuadro 2.2		Jerarquización de los métodos de estimación	
Orden	Método de estimación	Clave	
1	Medición directa o monitoreo	MD	
2	Factores de emisión	FE	
3	Extrapolación	DH	
4	Balance de materiales	BM	
5	Cálculos de ingeniería	CI	
6	Modelos matemáticos de emisión	OM	

FUENTE: INE, 2000a.

En el capítulo siguiente se establece la situación de la industria mexicana, el uso de agua dentro de sus procesos y los principales subsectores industriales generadores de agua residual concentrada, con el objetivo de determinar el giro industrial que será empleado como caso de estudio. Una vez obtenido éste, se desglosa su proceso productivo, se definen los puntos de generación y/o emisión de contaminantes, y finalmente se establece la naturaleza genérica de dichas emisiones.

Capítulo 3: Fuentes de emisiones contaminantes en México

El proceso de industrialización de México principia a finales del siglo XIX con la instalación de empresas textiles, cementeras, cerveceras y de alimentos. Sin embargo, fue hasta la década de los cuarenta cuando, debido a la escasez de bienes manufacturados a causa de la Segunda Guerra Mundial, se inicia realmente el desarrollo industrial del país.

En ese entonces la producción industrial se abocó a satisfacer la demanda interna mediante factorías, de tamaño reducido y baja productividad establecidas principalmente en tres zonas del país: Valle de México, Guadalajara y Monterrey, que no podían competir en los mercados internacionales. Esta política de crecimiento ocasionó que México se convirtiera en importador de bienes de consumo y exportador de materias primas, con el consecuente agotamiento de los recursos naturales.

Aunado a ello, las características del mercado interno propiciaron una estructura industrial polarizada, por una parte se generó un pequeño grupo de grandes corporaciones en las ramas productivas de mayor demanda y crecimiento, y por otra, una multitud de pequeñas empresas familiares y artesanales funcionando en condiciones precarias.

Hasta 1970, prácticamente no se aplicó ningún criterio ambiental al desarrollo industrial de México, a pesar del creciente deterioro ambiental. La política de precios bajos en energéticos propició su uso intensivo y un crecimiento acelerado de la demanda; se calcula que de 1950 a 1970 el consumo de gas aumentó 33 veces, el de diesel 8, el de lubricantes 40, el de gasolina 4 y el de electricidad 7 veces, sin que este aumento fuera proporcional a la producción obtenida (INE, 2000d).

Puede afirmarse entonces que los precios bajos en energéticos, la baja productividad industrial y la falta de una política ambiental, configuraron el cuadro para un rápido crecimiento de los índices de contaminación en México.

3.1 Panorama de la industria mexicana

La industria nacional ha pasado por distintos escenarios a lo largo de las últimas décadas; desde los relativamente estables en los años sesenta, el problema de la deuda externa en los setenta, la recesión e inflación de los ochenta y finalmente el entorno actual de globalización.

Hacia finales de los 80's y principios de los 90's, en el marco de la globalización económica, el desarrollo industrial de México transcurre bajo un esquema de mayor competencia con el exterior y reestructuración técnica de los establecimientos industriales; México ingresa al GATT, firma el Tratado de Libre Comercio y se incorpora a la OCDE como miembro.

La apertura del mercado doméstico, que funcionó más de medio siglo bajo un criterio proteccionista, y los eventos económicos ocurridos en el país, generaron numerosas dificultades para la industria mexicana; pese a ello, el sector industrial sigue siendo la parte más productiva de la economía.

De 1988 a 1994 el producto interno bruto (PIB) y el empleo industrial crecieron en 28.4 y 24.1%, respectivamente (INE, 2000d). Hacia 1996 el PIB alcanzó un crecimiento de 10.4%, destacando la industria manufacturera¹ (INEGI, 1997a). En el cuadro siguiente se puede observar la aportación de cada sector económico al PIB nacional (cuadro 3.1).

Cuadro 3.1		
Porcentaje de participación al PIB nacional por sector económico (1996)		
Sectores económicos	Millones de pesos	Porcentaje
Agricultura, silvicultura y pesca	61 355	5.3
Minería	17 185	1.5
Manufactura	243 755	21.2
Construcción	55 787	4.8
Electricidad, gas y agua	21 633	1.9
Comercios, restaurantes y hoteles	239 786	20.8
Transportación, almacenamiento y comercio	120 623	10.5
Servicios financieros	195 246	15.5
Servicios comunitarios, sociales y personales	227 343	18.5
TOTAL	1 250 913	100.0

FUENTE: INEGI, 1997a.

En lo que concierne al PIB manufacturero, en 1996 las divisiones con mayor peso fueron: productos metálicos, maquinaria y equipo con 27.7%; productos alimenticios, bebidas y tabaco con 25.1%, y la industria química, petroquímica y del caucho con 15.6% (cuadro 3.2).

Cuadro 3.2		
Porcentaje de participación al PIB Industrial, ramas manufactureras (1996)		
Rama de actividad	Millones de pesos	Porcentaje
Alimentos, bebidas y tabaco	61 235	25.1
Textiles, vestido y cuero	22 577	9.3
Industria de la madera	6 691	2.7
Papel, imprenta, editorial	10 659	4.4
Química, petroquímica, caucho	38 024	15.6
Minerales no metálicos	17 544	7.2
Industria metálica básica	13 109	5.4
Maquinaria y equipo	67 469	27.7
Otras industrias manufactureras	6 448	2.6
TOTAL	243 755	100.0

FUENTE: INEGI, 1997a.

¹ De acuerdo al INEGI, en México el sector manufacturero engloba el 99% de los establecimientos industriales. El 1% restante es conformado por industrias de los sectores: construcción y minería, principalmente.

El proceso de globalización, con la consecuente apertura de mercados, ha favorecido el establecimiento del tema ambiental como una variable de negociación económica internacional, principalmente en lo relacionado con los esquemas regulatorios que rigen dichas negociaciones.

En este contexto de competencia, la gestión ambiental en México se ha abocado al logro de un modelo de desarrollo que integre capacidad productiva y utilización eficiente de recursos. Además, compartiendo el mismo objetivo, existe en el país un amplio y creciente sector de empresas que están adoptando estándares ecológicos internacionales, mediante los cuales se someten voluntariamente a inspecciones de sus procesos para obtener certificados de administración ambiental. Ejemplo de estos modelos voluntarios son: la norma ISO 14000² surgida a partir de la Conferencia de Río (1992), el British Standard 7750 y el código ambiental de la Unión Europea, EMAS³.

A pesar de estos esfuerzos, persiste en México un marcado atraso en el eficiente aprovechamiento de recursos, notablemente acentuado en el uso de agua por parte del sector industrial. Éste se encuentra caracterizado por un elevado nivel de aprovechamiento y un bajo nivel de reúso o tratamiento, lo que genera altos niveles de contaminación y presiones sobre su disponibilidad.

Del total de agua empleado para el uso industrial, se calcula que 50% se utiliza para enfriamiento, 35% en procesos, 5% en calderas y 10% en servicios. Se estima que el empleo de agua de primer uso podría reducirse de 40 a 80% si se extendieran las prácticas de reúso, por ejemplo en enfriamientos, y se instalaran implementos ahorradores (Ortiz-Rendón, 1996).

Esta problemática se acrecienta por la composición de la industria en México, ya que el 97% de ella esta integrada por micro y pequeñas empresas (INEGI, 1997b), con falta de recursos para la instalación de plantas de tratamiento, dispositivos de control y equipos con tecnología más "limpia". De allí que en la industria nacional el empleo de agua, y en general el uso de recursos, se pueda definir como poco eficiente.

3.1.1 Uso de agua en México

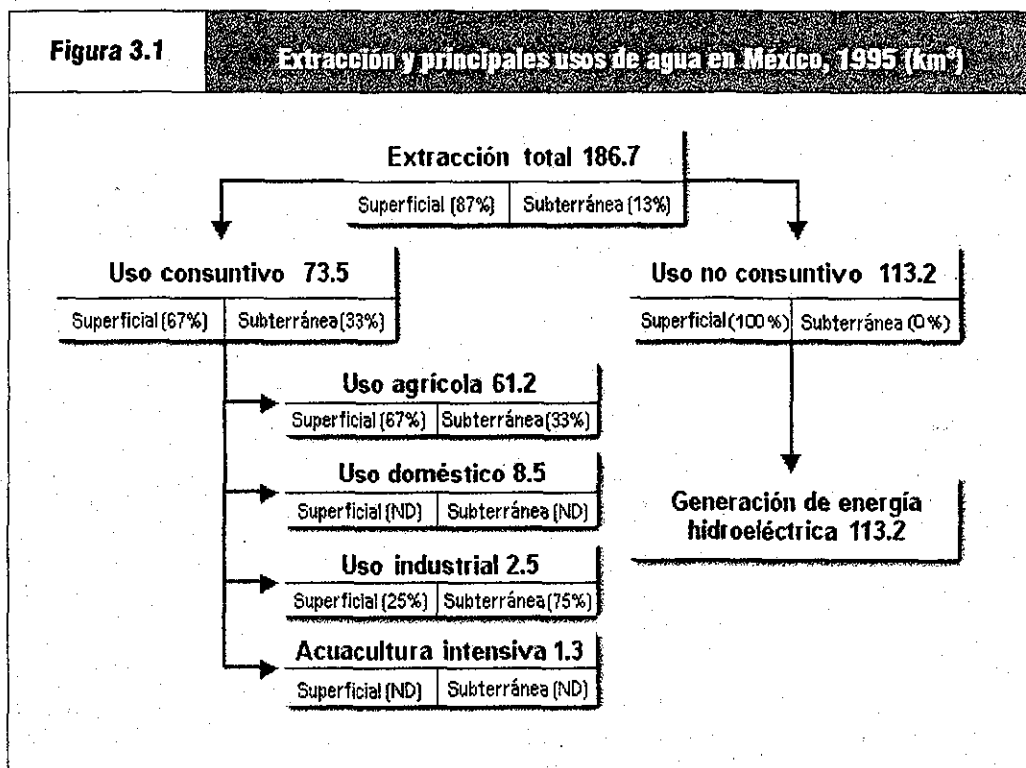
El territorio mexicano cuenta con una superficie cercana a los 2 millones de km², de los cuales 65% es árido o semiárido. En dicha porción del territorio se dispone de únicamente 20% de los recursos hídricos, mientras que ahí se asientan tres cuartas partes de la población (SEMARNAP, 1997a).

México tiene una precipitación media anual de 780 mm, un escurrimiento promedio de 417 km³ al año (1% del escurrimiento mundial) y disponibilidad media por habitante de 5,125 m³/año, que representa el doble del promedio per cápita a nivel mundial. Pese a ello, dicho volumen de agua resulta insuficiente para considerar a México como un país de gran disponibilidad, debido principalmente a la desigual distribución del recurso en el territorio (CNA, 1995).

² Del inglés: International Standard Organization, serie 14000.

³ Del inglés: Eco Management and Audit Scheme.

El uso de agua se clasifica como consuntivo y no consuntivo⁴. De acuerdo al Programa Hidráulico 1995-2000, se estima que en 1995 la extracción para los principales usos fue de 186.7 km³, distribuidos como se indica en la figura 3.1.



FUENTE: CNA, 1995.

En lo concerniente al uso industrial, se calcula que su uso representa el 2.5% de la extracción total del país, donde 90% de éste es abastecido por fuentes propias y el resto de tomas provenientes de redes municipales (CNA, 1995). Por lo que toca a la generación de agua residual, en 1994 el gasto reportado fue de 64.5 m³/s. Para el año 2000 se estimaba que la descarga industrial ascendería a 82 m³/s (SEMARNAP, 1997a); sin embargo, el gasto valorado fue de 170 m³/s (CNA, 2000).

3.1.2 Fuentes generadoras de agua residual industrial

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

De acuerdo con el INDAR, en México los usuarios con mayores volúmenes de descarga son: ingenios azucareros (38.8%), industria química (21.0%), industria del petróleo (8.2%) y la industria de la celulosa y papel con 6% del empleo. En cuanto a carga contaminante la mayor aportación se encuentra en: ingenios y destilerías, que abarcan la producción de vinos, licores y alcohol de caña; la industria petrolera; la actividad agropecuaria, principalmente porcícolas y beneficios de café; la producción de alimentos; además de minería, celulosa y papel, metalmeccánica y textiles (cuadro 3.3). Se estima que las descargas de estas industrias representan el 92% del total generado en el país (CNA, 2000).

⁴ El uso consuntivo aprovecha el agua y sólo retoma una parte de ésta a los cuerpos de agua; el uso no consuntivo, como el uso en generación hidroeléctrica, retoma la totalidad del agua aprovechada (CNA, 1995).

Cuadro 3.3		DBO ₅ y SST en las descargas de agua residual industrial			
Giro industrial	SST (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	Giro industrial	SST (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)
Agropecuario	2,731	2,587	Manufacturera	273	394
Alimentos y bebidas	1,492	2,216	Metalmecánica	125	640
Automotriz y afines	206	413	Minera	3396	460
Azúcar	486	1,078	Minerales no metálicos	337	243
Beneficio de café	399	4,116	Municipal	314	335
Celulosa y papel	378	651	Petróleo	3,499	2,955
Cerveza y malta	93	2,461	Química	1,709	1,978
Destilería	7,810	17,058	Servicios	529	314
Electrónica y eléctrica	114	277	Tenerías (curtidurías)	998	2,909
Hospitales y servicios	493	184	Termoeléctricas	12	34
Maderera y forestal	132	128	Textil	53	585

FUENTE: CNA, 2000.

Como se observa, en la industria mexicana existen múltiples establecimientos que emplean una gran cantidad de agua y emiten elevadas concentraciones de contaminantes. Esta situación hace imperante la necesidad de auditar con mayor detalle las condiciones de dichos sectores, ya que, como se dijo en el capítulo anterior, su conocimiento puede permitir el control del 80% de la contaminación descargada a cuerpos de agua y bienes de propiedad nacional (CNA, 2000).

Para la elección del giro industrial que será empleado como caso de estudio, se consideran aquellos sectores definidos como de preocupación ambiental en Norteamérica. De acuerdo con el NAPRI, las industrias de mayor inquietud en la zona son: metálica básica, química y papel. Además de éstas, en México la industria azucarera, petrolera, alimenticia, curtiembre y minera se consideran neurálgicas para el mejoramiento de la calidad ambiental.

No obstante, dada la necesidad de información predominante, resultará igualmente substancial el estudio de cualquiera de estos subsectores industriales. Por tanto, tomando en cuenta los factores antes mencionados y la disponibilidad de información, se ha elegido trabajar con el giro industrial de la celulosa y papel.

3.2 Industria de la celulosa y papel

La primera industria productora de celulosa y papel, dentro del concepto moderno, se establece en México a finales del siglo XIX. A partir de entonces se ha fabricado papel con materiales diversos como: pajas de trigo, zacatonés, barbas de coco, copetes de piña, bagazos de caña, desperdicios de henequén, borra de algodón, madera y desperdicios de papel y cartón. Actualmente se elabora papel a partir de madera, material de reciclaje y bagazo de caña, quedando en desuso otros materiales por razones económicas, de calidad o de disponibilidad (INE, 2000a).

Para comprender el proceso productivo de esta industria, se define enseguida los principales conceptos manejados dentro de ella.

La madera está constituida principalmente por dos polímeros biológicos: celulosa y lignina; que se encuentran estrechamente interpenetrados por una mezcla de polisacáridos denominados hemicelulosas. Por lo general, en la madera 40% es celulosa, 28% hemicelulosa, 28% lignina y de 3 a 10% compuestos extractivos (WRM, 2000).

Durante la fabricación de celulosa o pulpa, como también es llamada, el objetivo principal es eliminar la lignina causando el menor daño a las fibras. Para el fabricante, la lignina es el componente de la madera que ocasiona la mayoría de los problemas durante el proceso productivo, debiendo aplicar fuertes reactivos, alcalinos o ácidos, a la madera a fin de obtener pulpa para papel.

Celulosa. La celulosa es un polímero largo de hidrocarburos que constituye el principal componente de los tejidos vegetales. Este polímero existe en tres formas: alfa, beta y gamma. Alfa-celulosa tiene el grado máximo de polimerización⁵ y es el principal constituyente de la pulpa para papel. Las formas beta y gamma tienen un grado de polimerización menor y son conocidas como hemicelulosas. El grado de polimerización es aproximadamente 1000 para pulpa de madera, llegando a 3000 en el caso de fibras de algodón (The Merck Index, 1996).

La celulosa industrial se obtiene a partir de la separación de fibras naturales, ésta puede llevarse a cabo mecánicamente o mediante un proceso químico de disolución de lignina. Dependiendo del proceso productivo las celulosas se clasifican en químicas y mecánicas.

Celulosa química. Se obtiene mediante la cocción, en solución alcalina, de madera a alta temperatura y presión con el objetivo de disolver la lignina. Dependiendo de los aditivos químicos utilizados existen, entre otros, procesos tipo kraft⁶ y a la sosa; siendo el primer método el más empleado a nivel mundial (USEPA, 1995).

La celulosa química se caracteriza por tener un rendimiento relativamente bajo, sólo entre un 40 y un 60% del material original, madera, queda retenido como producto final, pulpa (ANDI, 2000). La celulosa química es muy resistente ya que las fibras quedan intactas, es fácil de refinar y poco propensa a perder sus cualidades con el tiempo (CICEPLA, 1999).

Celulosa mecánica. El proceso implica la reducción de la madera a su estado fibroso por medios puramente mecánicos, es decir, sin el empleo de reactivos químicos. El método consta de la molienda en húmedo de madera hasta obtener el material fibroso (CNICP, 2000a).

La celulosa mecánica se define por tener un alto rendimiento, normalmente de un 85 a un 95% (ANDI, 2000); sin embargo, la lignina remanente en el producto es susceptible a oxidarse, generando el color amarillo que caracteriza el papel periódico viejo. Este tipo de celulosa es menos resistente, no por la presencia de la lignina residual, sino por que sus fibras han sido cortadas durante su fabricación (ATCP, 1999).

El proceso mecánico cuenta con algunas variantes, como las que se observan en el cuadro 3.4. Enseguida se define la celulosa TMP (Thermo Mechanic Pulp), ya que su fabricación se realiza en México.

⁵ Número de unidades de monómero por molécula media de polímero.

⁶ Palabra alemana que significa resistente.

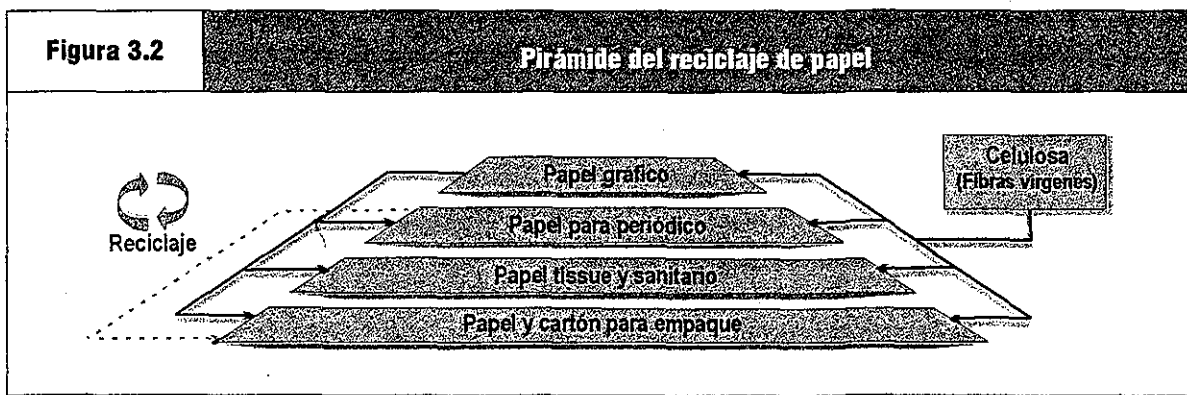
Celulosa TMP. Es una variante del proceso mecánico, en el cual la madera se calienta con vapor antes de ser triturada. El proceso presenta una ventaja y dos inconvenientes, la ventaja es que se puede utilizar toda la madera a excepción de la corteza; las desventajas son: la baja calidad del producto por la formación de fibras cortas y la lignina remanente en la celulosa TMP (WRM, 2000).

A nivel mundial, de 175 millones de toneladas de pulpa producidas durante 1998, el 76% correspondió a pulpa química y el restante a pulpa mecánica (CICEPLA, 1999). En el cuadro 3.4, se muestra la producción de los países que integran la Confederación Industrial de la Celulosa y del Papel en Latinoamérica, entre ellos la de México.

Otra forma de clasificar a las pulpas es mediante el tipo de materia prima utilizada. Dependiendo de ésta existe celulosa de fibra larga (*softwood pulp*) y de fibra corta (*hardwood pulp*); la longitud de las fibras largas fluctúa entre 2.5 y 4.5 mm, contra los 0.7 a 1.8 mm de las fibras cortas. La diferencia principal entre ellas es su resistencia, que depende básicamente de las uniones que se establecen entre las fibras; la celulosa de fibra larga genera en el papel una red de uniones más resistente que la obtenida con fibra corta.

Dependiendo del tipo de fibras utilizadas en la elaboración de la pasta se pueden obtener diversos tipos de papel; actualmente se cuentan más de 450 variedades según la clasificación del International Pulp and Paper Directory.

El reciclaje es cada vez más relevante en la industria papelera. La recuperación a nivel mundial ha pasado de 48 millones de toneladas en 1980 a 134 millones en 1998, es decir, del 23 al 45% respecto del consumo (CICEPLA, 1999). Sin embargo, la degradación de las fibras impone límites a la calidad del papel que se puede producir con material reciclado, por lo que generalmente se deben agregar fibras vírgenes durante la producción (la pirámide del reciclaje se muestra en la figura 3.2).



FUENTE: Adaptación libre de ANDI, 2000.

Papel. El papel es una estructura obtenida mediante fibras de celulosa que se han entrecruzado, formando una hoja resistente y flexible. La manufactura del papel comprende operaciones esencialmente mecánicas, basadas en la tendencia de las fibras en suspensión a unirse entre sí cuando se secan.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Producción de celulosa en Latinoamérica 1999 (toneladas)

Tipo de pasta	Total	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	Ecuador	México	Uruguay	Venezuela
Total pastas celulósicas	10,700,681	749,448	6,686,906	2,209,574	313,300	2,674	526,244	32,720	136,815
Pastas de madera	10,130,174	634,875	6,611,295	2,209,574	176,848	1,974	344,100	32,720	118,788
Mecánica	397,920	6,962	205,602	185,146	0	0	0	210	0
Fibra larga	390,748	0	205,602	185,146	0	0	0	0	0
Fibra corta	6,962	6,962	-	0	0	0	0	0	0
TMP	235,795	0	177,168	44,712	0	0	13,915	0	0
Fibra larga	221,880	0	177,168	44,712	0	0	0	0	0
Fibra corta	0	0	-	0	0	0	0	0	0
CTMP	96,906	0	72,743	0	0	0	0	0	24,163
Fibra larga	85,236	0	72,743	0	0	0	0	0	12,493
Fibra corta	11,670	0	-	0	0	0	0	0	11,670
Semiquímica	278,346	176,279	27,392	0	34,240	0	0	3,500	36,935
Fibra larga	16,770	48	0	0	7,053	0	0	0	9,669
Fibra corta	258,076	176,231	27,392	0	27,187	0	0	0	27,266
Química	9,121,207	451,634	6,128,390	1,979,716	142,608	1,974	330,185	29,010	57,690
Al sulfito	48,876	28,306	20,570	0	0	0	0	0	0
Fibra larga	20,570	0	20,570	0	0	0	0	0	0
Blanqueada	20,360	0	20,360	0	0	0	0	0	0
Sin blanquear	210	0	210	0	0	0	0	0	0
Fibra corta	28,306	28,306	0	0	0	0	0	0	0
Blanqueada	28,306	28,306	0	0	0	0	0	0	0
Sin blanquear	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al sulfato y a la soda	9,072,331	423,328	6,107,820	1,979,716	142,608	1,974	330,185	29,010	57,690
Fibra larga	3,369,287	352,311	1,161,491	1,537,898	66,207	1,729	221,294	850	27,507
Blanqueada	1,662,708	276,736	74,918	1,175,589	0	836	107,122	0	27,507
Sin blanquear	1,705,729	75,575	1,086,573	362,309	66,207	893	114,172	0	0
Fibra corta	5,674,884	71,017	4,946,329	441,818	76,401	245	108,891	0	30,183
Blanqueada	5,435,695	70,900	4,739,250	439,940	76,401	245	108,891	0	68
Sin blanquear	239,189	117	207,079	1,878	0	0	0	0	30,115
Pastas de otras fibras	527,507	114,573	75,611	0	136,452	700	182,144	0	18,027
De bagazo	460,408	113,224	10,892	0	135,450	700	182,144	0	17,998
Blanqueada	430,302	113,224	0	0	127,977	0	182,144	0	6,957
Sin blanquear	30,106	0	10,892	0	7,473	700	0	0	11,041
Otras fibras	67,099	1,349	64,719	0	1,002	0	0	0	29

FUENTE: CICEPLA, 1999.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Las propiedades del papel se pueden agrupar en mecánicas o de resistencia y visuales o de presentación. La rigidez es una de las principales propiedades mecánicas. Ésta depende de las fibras que conforman la hoja; el papel hecho con mayor contenido de fibra larga será más rígido que el fabricado con fibra corta. Otras propiedades mecánicas son la resistencia al rasgado, la resistencia superficial y la resistencia a la absorción de agua.

En cuanto a las características visuales, se distinguen principalmente blancura, brillo, tersura y opacidad. Por último, otras cualidades importantes son el gramaje que indica el peso en gramos por metro cuadrado de papel, la estabilidad dimensional que es la capacidad del papel para mantener sus dimensiones originales al variar las condiciones ambientales o al verse sometido a esfuerzos, y la humedad que es el contenido de agua como porcentaje en peso del papel.

En la página siguiente se presenta el cuadro 3.5, que resume la producción de papel de Latinoamérica, al igual que la alcanzada en México durante 1998.

3.2.1 Importancia económica

En 1999 la industria celulósico-papelera nacional agrupó 64 fábricas, con una capacidad instalada de 4,428,000 toneladas de papel al año. Esta industria representó 0.42% del PIB nacional, 1.59% del industrial y 2.14% del manufacturero, dando empleo directo a 27,937 personas (CNICP, 2000b).

Para el mismo año, la producción de celulosa fue de 526 mil toneladas, distribuyéndose en los estados de Michoacán, 41.6%; Chihuahua, 23.6%; Jalisco, 15.4%; Veracruz, 10.4%; y Oaxaca, 9% (CNICP, 2000b).

Por su parte, la producción de papel alcanzó un volumen de 3,796,000 toneladas (distribuidas como se indica en la figura 3.3), de este total 2,167,651 toneladas correspondieron a papel para empaque, 945 mil a papel para escritura e impresión, 661 mil a papel sanitario y facial, y 21 mil toneladas a papeles especiales.

En lo que respecta al reciclaje de papel, en 1999 de un consumo total de 4,385,700 toneladas de materia prima fibrosa, 3,451,000 correspondieron a fibras secundarias (recicladas). Con esto se alcanzó una utilización de fibras secundarias de 78% respecto del consumo (CNICP, 2000b). Cabe señalar que este nivel de reciclaje es un indicador de la calidad del material producido en México, ya que, de acuerdo con USEPA, la máxima proporción de fibras secundarias en una pasta para papel o cartón debería ser de 50% debido a la pérdida de calidad en las fibras (USEPA, 1995).

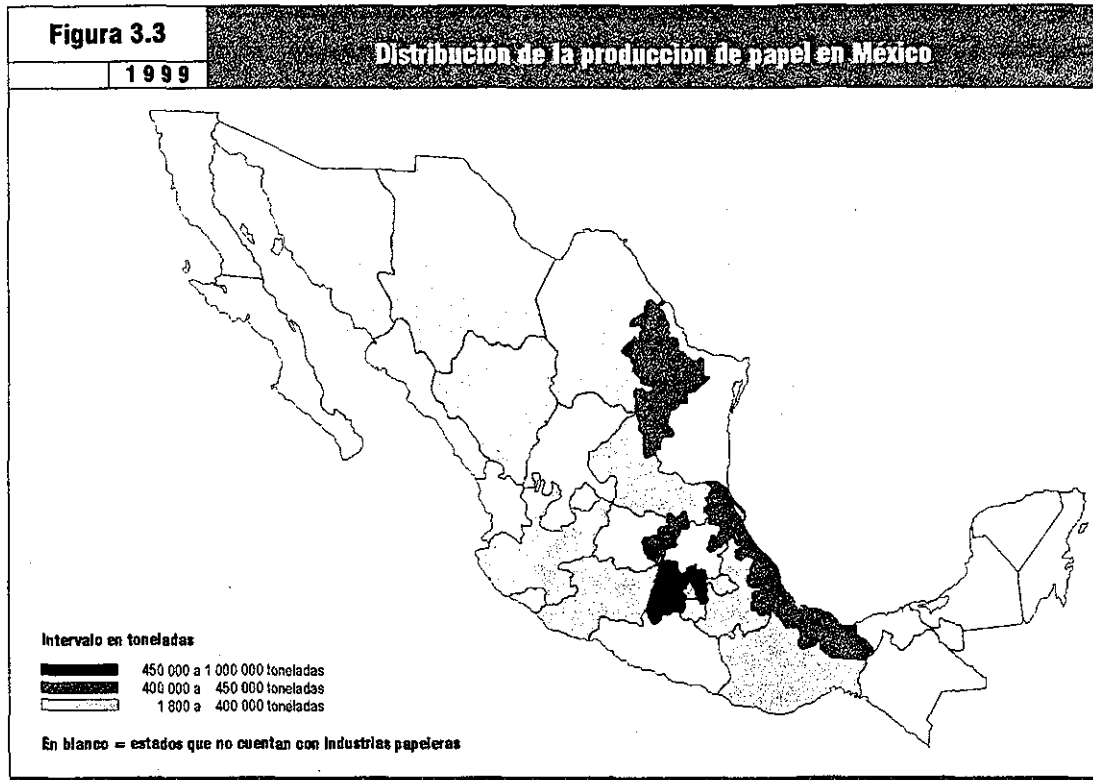
3.2.2 Proceso de fabricación de celulosa

Los principales procesos que se utilizan en México para fabricar pulpa de madera son los métodos a la sosa y al sulfato; en ambos, el esencial producto químico utilizado es el hidróxido de sodio. El método al sulfato o *kraft* es el más difundido en México (CNICP, 2000a).

Cuadro 3.5
Producción de papel y cartón en Latinoamérica 1999 (toneladas)

Tipo de papel	Total	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	Ecuador	México	Perú	Uruguay	Venezuela
Total papel, cartón y cartulina	13,758,747	1,159,018	6,589,301	641,985	710,976	143,501	3,669,366	118,989	88,413	637,198
Papeles para imprimir y escribir	4,261,201	426,271	2,231,625	300,475	208,029	0	931,276	14,451	47,800	101,274
Para periódicos	922,634	174,588	273,517	162,985	29	0	311,515	0	0	0
Otros para imprimir y escribir	3,338,567	251,683	1,958,108	137,490	208,000	0	619,761	14,451	47,800	101,274
Recubiertos	484,264	30,052	287,359	0	28,457	0	99,985	807	24,400	13,204
Sin recubrir	2,854,303	221,631	1,670,749	137,490	179,543	0	519,776	13,644	23,400	88,070
Papeles para corrugar	4,954,868	395,321	2,339,521	112,077	228,040	99,478	1,524,913	48,275	19,956	187,288
Liner	2,803,536	160,861	1,394,285	43,785	140,746	22,911	911,982	20,258	8,656	100,052
Kraft Liner	2,311,487	70,483	1,164,459	n.d.	37,040	16,385	911,982	20,258	156	90,724
Test Liner	448,264	90,378	229,826	n.d.	103,706	6,526	0	0	8,500	9,328
Onda (Medium, corrugado)	2,151,332	234,460	945,236	68,292	87,294	76,567	612,931	28,017	11,300	87,236
Semiquímico / Químico	793,143	54,809	63,387	n.d.	43,330	0	612,931	8,500	0	10,186
Reciclado	1,289,897	179,650	881,849	n.d.	43,964	76,567	0	19,517	11,300	77,050
Papeles Kraft	933,804	45,783	479,217	44,494	36,721	11,223	247,004	5,370	117	63,875
P/ sacos multipl. gran capacidad	598,978	27,772	282,146	32,216	36,721	10,804	175,863	4,380	0	29,076
P/ bolsas de pequeña capacidad	179,191	12,506	103,048	4,622	0	419	31,091	990	0	26,515
Otros	155,636	5,506	94,023	7,656	0	0	40,050	0	117	8,284
Para estuches plegadizos	1,090,753	57,504	491,653	68,684	50,171	2,100	321,575	2,504	0	96,562
Sólidos	32,070	442	22,528	0	7,678	0	0	0	0	1,422
Multicapas	1,058,683	57,062	469,125	68,684	42,493	2,100	321,575	2,504	0	95,140
Recubiertos	889,781	47,977	422,212	60,898	n.d.	600	307,480	0	0	50,614
Sin recubrir	126,409	9,085	46,913	7,786	n.d.	1,500	14,095	2,504	0	44,526
Otros papeles y cartones para envoltura y envase	273,829	93,246	130,249	7,295	31,859	7,200	0	0	3,980	0
Para uso doméstico y sanitario	1,808,622	124,679	573,599	100,909	128,495	23,500	621,566	42,199	11,450	182,225
Higiénico	1,450,145	93,873	459,867	82,030	112,087	18,000	493,821	39,502	11,053	139,912
Otros usos domésticos	358,477	30,806	113,732	18,879	16,408	5,500	127,745	2,697	397	42,313
Pañuelos (facial)	19,704	53	2,677	n.d.	1,307	2,000	13,667	0	0	n.d.
Servilletas	114,347	8,989	16,582	n.d.	7,261	3,500	76,821	797	397	n.d.
Otros	163,234	21,764	94,473	n.d.	7,840	0	37,257	1,900	0	n.d.
Otros papeles y cartones no incluidos anteriormente	435,670	16,215	343,437	8,051	27,661	0	23,032	6,190	5,110	5,974

FUENTE: CICEPLA, 1999.

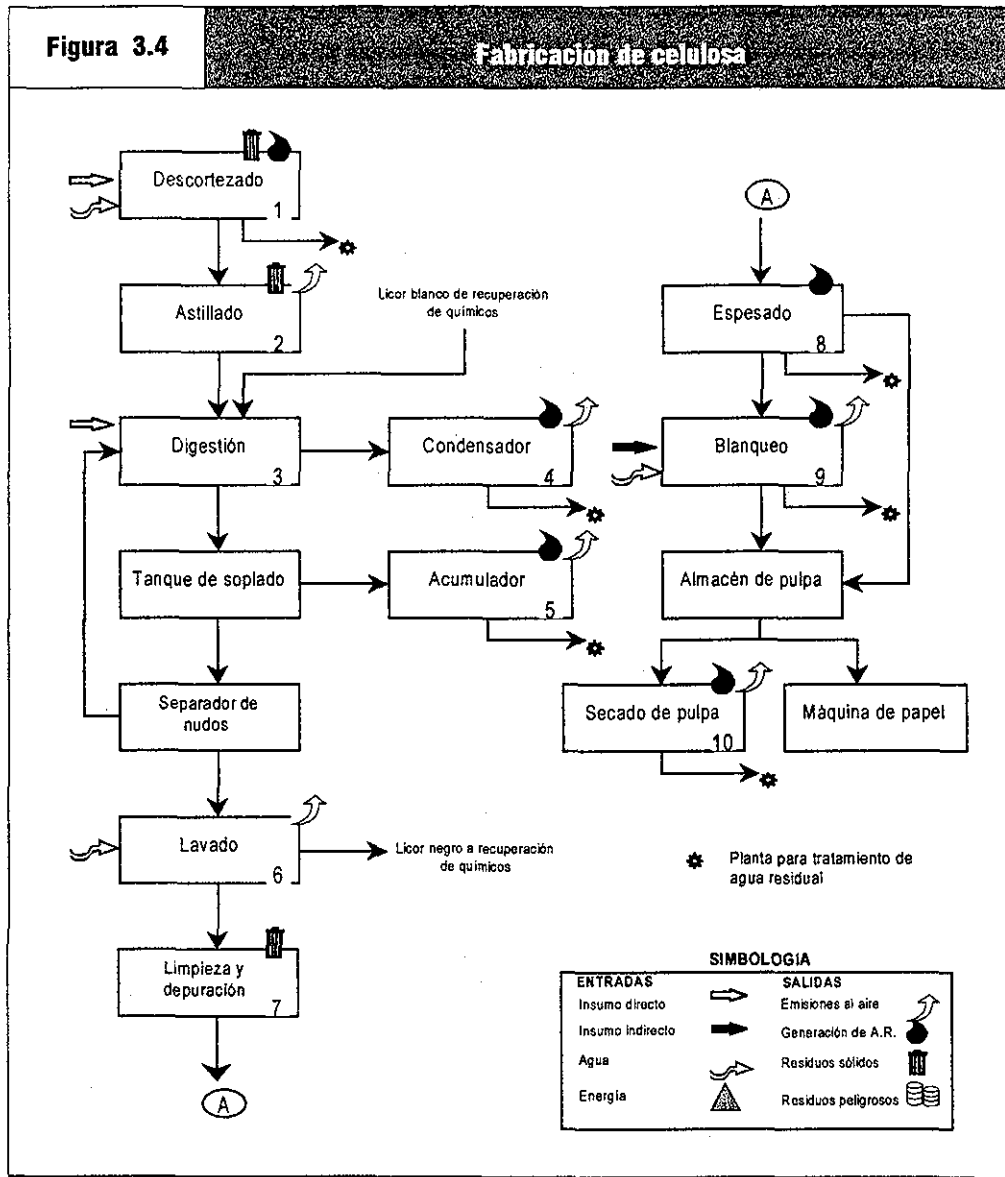


El proceso kraft consta de las etapas que se muestran en la figura 3.4. La manufactura inicia con el almacenamiento de la materia prima, misma que puede arribar a la industria en forma de troncos, astillas o desperdicios de madera. El acopio se realiza comúnmente en pilas (troncos) o en grandes montones al aire libre (astillas). Las primeras etapas del proceso tienen por objeto acondicionar la materia prima para su ingreso a las unidades de proceso. Dicho acondicionamiento se realiza en las operaciones de descortezado y astillado.

Descortezado

La corteza es un material indeseable para los fabricantes de celulosa, su presencia genera bajas eficiencias durante la cocción, mayor utilización de álcali, consumo elevado de agentes de blanqueo y una pulpa sucia y débil (Libby, 1979). La cantidad de corteza tolerable depende de las operaciones de la fábrica, de su equipo y del uso final del material producido. La mayoría de las industrias procuran tener como máximo 1% de corteza en peso dentro de las astillas, aunque con frecuencia lo rebasan.

El objetivo de esta operación es eliminar la máxima cantidad de corteza sin producir daños a la madera; sin embargo, ningún descortezado es eficiente al 100%. Los tres principales tipos de descortezadores son: tambor, anillo e hidráulico. De ellos, los de tambor e hidráulico requieren un suministro de agua constante; el primero para conducir los trozos de corteza fuera de la unidad y el segundo para emplearla como medio de corte, es decir, mediante un chorro de agua a presión.



FUENTE: Adaptación libre de INE (2000a) y Bryce (1991).

Astillado

La mayoría de los astilladores funcionan mediante un disco giratorio provisto de cuchillas situadas radialmente en su superficie. Una vez formadas, las astillas deben ser clasificadas antes de su ingreso al digestor. La distribución de tamaños es la especificación más importante en lo que concierne a la calidad de astillas (CNICP, 2000a).

El proceso de selección es relativamente sencillo, se hace pasar un flujo de astillas no clasificadas por una serie de cernidores con aberturas de tamaño decreciente. Las de mayor tamaño son devueltas al astillador y las de menor dimensión o finos, pueden mezclarse con aserrín para la

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

producción de pulpa o ser transportadas junto con las cortezas para ser usadas como combustible en la generación de vapor.

Digestión

La operación de digestión se puede llevar a cabo en continuo o de manera intermitente (CNICP, 2000a). En esta etapa se introducen astillas y licor blanco en un autoclave (digestor), a una temperatura y presión dadas (175°C y 7–8 kg/cm², respectivamente).

Las astillas y el licor blanco deben contar con las características adecuadas. Un tamaño incorrecto de la materia prima puede ocasionar: taponamiento dentro del digestor, si las astillas son demasiado finas; o una gran cantidad de rechazos en las cribas, si éstas son demasiado grandes (Libby, 1979). Por otra parte, la carga de álcali⁷ y su concentración, deben ser correctamente determinados, ya que éstos son los factores de tipo químico que más afectan al proceso (USEPA, 1995).

La técnica para calcular la carga de álcali consiste en determinar los requerimientos de licor blanco con base en su concentración y la relación álcali/madera deseada. Algunas veces se agrega licor negro para obtener la proporción licor/madera requerida (Kenneth, 1970). La carga de álcali efectivo puede situarse entre 11 y 23% sobre el peso de la madera; sin embargo, a fin de completar la cocción en un tiempo razonable, comúnmente es agregado un 10% de productos químicos en exceso (Bryce, 1991).

La velocidad de degradación, tanto de la lignina como de los carbohidratos que componen la madera, depende fundamentalmente de la concentración de hidróxido de sodio. Concentraciones comunes oscilan entre 30 y 90 g/l (Bryce, 1991). Además, se sabe que la presencia de azufre acelera la disolución de lignina sin que aumente la degradación de las fibras. En sistemas kraft la sulfidez⁸ varía de 15 a 35%, encontrándose habitualmente entre 20 y 30% (Libby, 1979).

Tanque de soplado

Cuando se ha alcanzado el grado de cocción deseado, el contenido del digestor es descargado en un tanque de soplado. Usualmente esta operación se realiza a la presión de cocción o a una presión próxima (Bryce, 1991). En este tanque se separan de la pulpa el vapor y los gases no condensables⁹, en tanto que las fibras y el licor negro son conducidos al área de almacenaje. En dicha zona se puede continuar la separación de las fibras mediante agitación y/o adicionarse licor negro hasta lograr la consistencia adecuada para el bombeo del material a etapas posteriores.

Después de las operaciones de digestión y soplado, se requiere de una serie de separaciones físicas y de tratamientos mecánicos con el fin de preparar la pulpa para su uso final.

⁷ Expresada como NaOH + Na₂S (álcali activo), o como NaOH + ½ Na₂S (álcali efectivo).

⁸ En el licor blanco la sulfidez se define como la relación en porcentaje del Na₂S al álcali activo, expresados ambos como Na₂O; en el licor verde, como la razón en porcentaje del Na₂S al álcali total, expresados ambos como Na₂O.

⁹ Las sustancias a las que se refiere este término se encuentran definidas en el punto 3.2.4.

Separador de nudos

Las pulpas cocidas hasta el punto de desfibración, o pasado éste, no requieren desintegración mecánica y usualmente pasan en forma directa sobre una criba para eliminar los rechazos. Estas cribas pueden ser de diseño vibratorio abierto, centrífugo o a presión. Por lo general, la consistencia que se maneja en esta etapa oscila entre 3 y 4% (Bryce, 1991). Los rechazos pueden volver al digestor para someterse de nuevo al proceso, o ser refinados mecánicamente.

Lavado

El sistema de lavado tiene dos objetivos fundamentales: retirar eficientemente el licor negro presente en la pulpa y entregar la totalidad de dicho licor al sistema de recuperación con la menor dilución posible. En una operación teóricamente ideal, la pulpa ha de ponerse en contacto con una cantidad de agua de lavado exactamente igual a su propio contenido líquido. El agua de lavado deberá entrar en la pulpa y desplazar por completo el licor original, sin que nada de dicha agua pase a través de las fibras con el licor desplazado. En estas circunstancias el licor negro es retirado por completo sin ninguna dilución.

Sin embargo, en la práctica estas condiciones no se presentan debido a que 1) hay encauzamiento y una mezcla en la interfase entre el licor negro y el agua de lavado; 2) parte del licor original queda atrapado dentro de las fibras y no tiene tiempo de difundirse en el flujo principal de licor; y 3) parte de los sólidos generados en la etapa de digestión continúan atrapados en la fibra, bien sea química o físicamente (Bryce, 1991). El método usualmente utilizado es el de lavadores con filtro al vacío, formado por 2 ó 4 unidades en serie que operan con el filtrado a contracorriente.

Depuración y limpieza

Luego del lavado, la pulpa presenta aún impurezas provenientes de la madera y fuentes externas como: partículas de madera, mazos de fibras, corteza, partículas de alquitrán, cascajo, sustancias metálicas e incrustaciones. Los métodos de separación se basan en diferencias de tamaño, forma, peso específico y superficie específica, en comparación con las fibras individuales.

La segregación se puede realizar mediante cribas finas y limpiadores centrífugos. Las cribas pueden ser abiertas o a presión, recomendándose el uso de éstas últimas ya que eliminan el atrapado del aire en la pulpa reduciendo con ello la formación de espumas¹⁰. Las cribas operan con consistencias cercanas a 2.5% (ANDI, 2000); no obstante, debido a los requerimientos de consistencia de las etapas subsiguientes, en muchas ocasiones es necesario espesar la pulpa por lo que comúnmente se ubica una unidad de espesamiento a continuación de los equipos de depuración y limpieza (etapa 8 de la figura 3.3).

¹⁰ La formación de espuma dificulta las operaciones subsiguientes.

Blanqueo

La lignina que permanece después de la cocción debe eliminarse si se desea obtener una pulpa de elevada blancura. El proceso se realiza en etapas múltiples, alternando operaciones ácidas y alcalinas. En la fase ácida se aplica un agente oxidante y en la alcalina se extraen de la pulpa los productos formados por la acción oxidativa. Los principales agentes de blanqueo y los códigos que los representan se muestran a continuación (cuadro 3.6).

Cuadro 3.6		Principales productos utilizados en el proceso de blanqueo en las industrias productoras de celulosa de Estados Unidos		
Agente de blanqueo	% de industrias que lo utilizan	Fórmula química	Código	
Hidróxido de sodio	100%	NaOH	E	
Cloro elemental	99%	Cl ₂	C	
Dióxido de cloro	89%	ClO ₂	D	
Hipoclorito	69%	HClO, NaOCl, Ca(OCl) ₂	H	
Oxígeno	64%	O ₂	O	
Peróxido de hidrógeno	43%	H ₂ O ₂	P	
Dióxido de azufre	10%	SO ₂	S	
Ácido sulfúrico	9%	H ₂ SO ₄	A	

FUENTE: USEPA, 1993.

El proceso de blanqueo disminuye el rendimiento general de la planta, ya que una parte de las fibras de celulosa se degradan con la acción de los agentes de blanqueo. En un sistema convencional, normalmente se pierde entre un 5 y un 10% de la pulpa café en el intento de alcanzar una blancura de 87 a 90% (ANDI, 2000). Este proceso se conforma por varias etapas, pudiendo utilizar hasta ocho (USEPA, 1993). Las secuencias de blanqueo comúnmente utilizadas por las industrias celulósico-papeleras de Estados Unidos se indican en el cuadro 3.7.

Cuadro 3.7		Secuencias de blanqueo
Códigos de secuencia	% de industrias en Estados Unidos que lo utilizan	
CEDED	38%	
CEHED	19%	
CEHDED	13%	
CEH, CEHP	8%	
Otras (por ejemplo dióxido de cloro en la primera etapa)	22%	

FUENTE: USEPA, 1995.

En los últimos años se han planteado nuevos esquemas de blanqueo. Entre otros se pueden mencionar el sistema ECF (del inglés: Elemental Chlorine Free), que se basa en la sustitución de las etapas que utilizaban cloro con dióxido de cloro, y el sistema TCF (del inglés: Totally Chlorine Free) que opera en ausencia total de cloro y sus compuestos.

Secado y embalado

La pulpa procedente del blanqueo, cuando se trata de una industria no integrada (que únicamente produce pulpa o papel), es preparada para su secado. La máquina utilizada¹¹ requiere una consistencia de 1 a 2% para lograr una distribución uniforme de la pulpa sobre la malla (CNICP, 2000a).

En la malla comienzan a producirse las primeras uniones entre las fibras, formando la lámina de papel; ésta pasa a continuación por prensas de succión y rodillos, extrayéndosele gran cantidad de agua. La lámina, que a esta altura del proceso posee una concentración aproximada de 46%, entra a los presecadores y secadores principales, adquiriendo una consistencia de 87–92% (INE, 2000a). Por último, la lámina de celulosa se corta en forma de pliegos o se enrolla formando bobinas.

Recuperación de reactivos químicos

La recuperación de reactivos forma parte integral en la producción de pulpa kraft debido al alto costo de éstos. El sistema de recuperación realiza cuatro funciones importantes:

- ♦ Destruye la materia orgánica, disgregada durante la etapa de digestión, eliminando una fuente potencial de contaminación de efluentes.
- ♦ Genera grandes cantidades de calor, con lo que se puede obtener una parte considerable de las necesidades caloríficas del proceso de digestión.
- ♦ Regenera el hidróxido de sodio consumido en la cocción.
- ♦ Convierte los compuestos de azufre presentes en el licor negro en sulfuro de sodio.

El proceso de recuperación puede reducir las pérdidas en productos químicos a 20 o 25 kg/t de pulpa (Bryce, 1991). En la figura 3.5 se muestran las etapas que componen el sistema de recuperación y los posibles puntos de generación y/o emisión de contaminantes (generación de residuos sólidos y peligrosos, emisiones al aire y descarga de agua residual).

Aireación. El licor negro, producto de la digestión, sale del sistema de lavado con un contenido de 12 a 15% de sólidos (ANDI, 2000); pasa a un tanque de aireación con el fin de oxidar completamente el dióxido de azufre, evitando la posible formación de sulfuro de hidrógeno y metilmercaptano en la etapa de evaporación (Bryce, 1991) y, posteriormente, es enviado al evaporador de efecto múltiple.

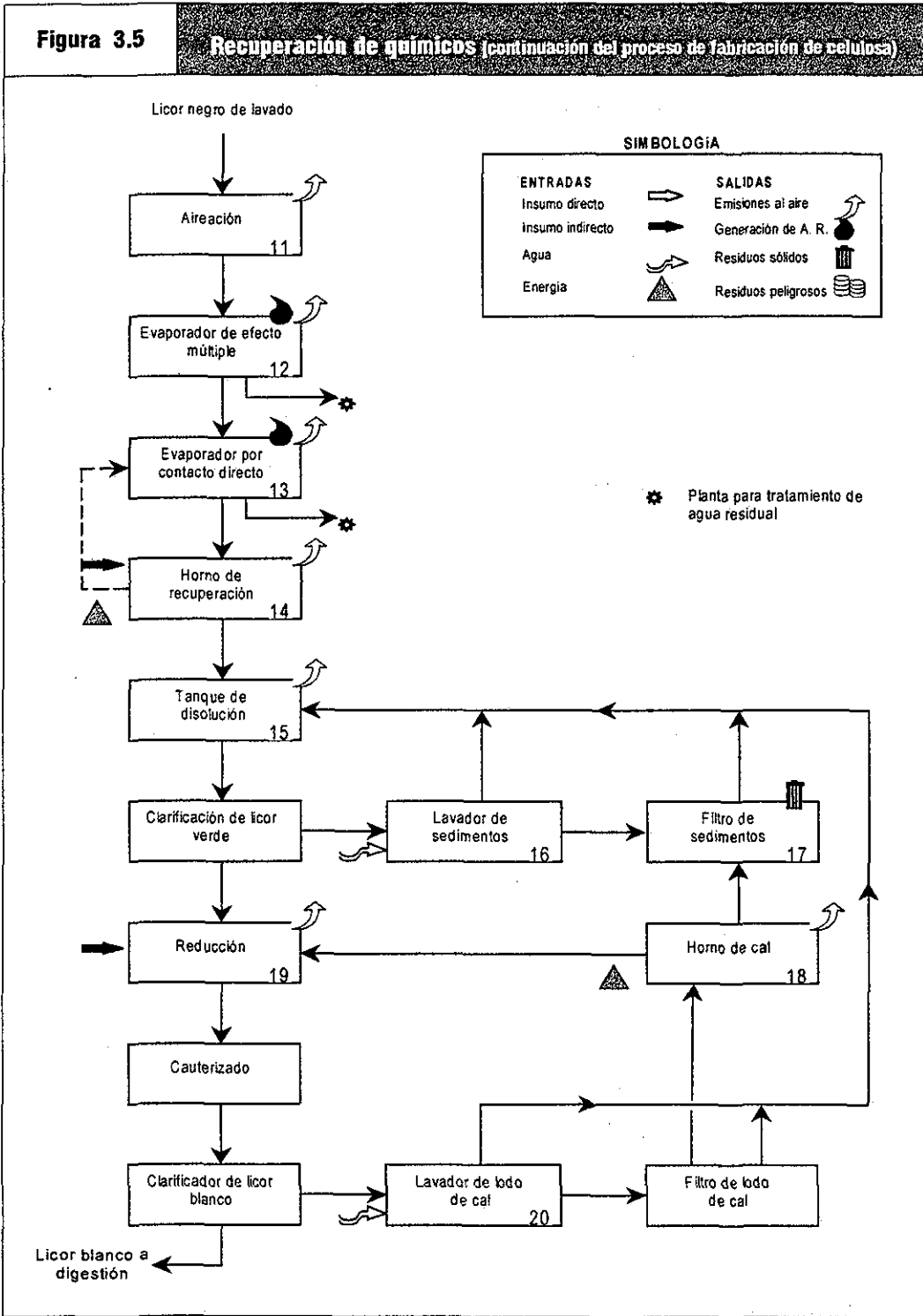
Evaporador de efecto múltiple. Un evaporador de efecto múltiple consiste en una serie de etapas en las que el vapor, formado al hervir el licor, se utiliza como fuente de calor para las otras fases. Normalmente se emplean de 5 a 6 efectos, obteniendo un contenido de sólidos de 45 a 50% (Bryce, 1991).

Evaporador por contacto directo. Para lograr un licor negro fuerte, en el margen de concentración de sólidos del 62 al 65%¹², se requiere una gasificación adicional después de los

¹¹ Conocida como Fourdrinier, ver máquina de papel en el glosario de términos.

¹² La concentración de sólidos en ese rango aumenta la capacidad como combustible del licor negro.

evaporadores de efecto múltiple. El contacto directo del licor que sale del efecto múltiple con los gases de escape del horno de recuperación, es el método que se ha utilizado para alcanzar dicho margen de concentración.



FUENTE: Adaptación libre de INE (2000a) y Bryce (1991).

Horno de recuperación. En esta unidad se recibe el licor negro concentrado, se quema y su residuo es descargado como producto fundido¹³ hacia un tanque. En dicho tanque las sales de sodio son disueltas mediante la adición de licor débil de lavado, conformando lo que se conoce como licor verde.

Durante el proceso de fabricación tienen lugar algunas pérdidas de sodio, principalmente en el lavado de la pulpa, los gases del horno de recuperación y los derrames durante la operación (Bryce, 1991). Estas pérdidas habrán de restaurarse agregando sodio al proceso. El sodio puede incluirse bajo la forma de torta salina (expresada como Na₂SO₄) agregada antes del horno de recuperación, o como sosa cáustica adicionada al licor blanco (Kenneth, 1970).

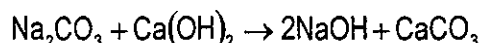
Una cantidad considerable del calor generada en esta etapa se utiliza para producir vapor mediante calderas situadas a continuación del horno.

Clarificación del licor verde. El primer paso del proceso de recaustificación consiste en eliminar el material insoluble presente en el licor verde. El flujo procedente del horno puede contener metales pesados, partículas finas de carbono y silicatos y aluminatos procedentes del recubrimiento refractario del horno (Bryce, 1991). Estos materiales, llamados heces de licor verde, no se disgregan durante el proceso de disolución.

Las heces no poseen buena sedimentabilidad, usualmente el lodo sedimentado contiene 10% de sólidos y una gran cantidad de sosa disuelta. Para recuperar esta sosa, dicho lodo es lavado y espesado antes de ser descartado (etapas de lavado y filtrado de sedimentos). El efluente puede ser utilizado para lavar lodo de cal o ser agregado directamente al tanque de almacenamiento de licor débil.

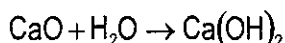
Recaustificación

La recaustificación queda comprendida en las etapas de reducción y cauterizado. Después de haber sido disuelto, el carbonato de sodio presente en la solución resultante (licor verde) debe recaustificarse a hidróxido de sodio antes de volverse a utilizar en el proceso de digestión. Esta conversión se lleva a cabo tratando el licor verde con hidróxido de calcio (cal apagada):



El carbonato de calcio producido en esta conversión se separa, lava y calcina, para regenerar la cal activa que volverá a utilizarse en la reacción de recaustificación.

Reducción y cauterizado. El licor verde clarificado se bombea a un tanque de apagado para ser mezclado con CaO procedente del horno de cal, más una cantidad de cal fresca para reponer la que se haya perdido. El óxido de cal se reduce a hidróxido mediante la reacción con el agua del licor verde.

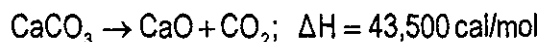


¹³ En forma de sales inorgánicas de sodio, principalmente carbonato de sodio y sulfuro de sodio.

Por lo general, el tanque de apagado se conforma de dos partes: una sección de mezclado en la que el licor verde se pone en contacto con la cal (apagado) y otra sección clarificadora en la que se completa el apagado separando el material grueso mediante rasquetas (cauterizado). Una vez que el licor ha pasado por los caustificadores deberán eliminarse los sólidos suspendidos para lograr un licor blanco listo para ser usado en la digestión.

Lavado y filtrado de lodo. El lodo procedente del clarificador de licor blanco debe lavarse para recuperar los compuestos de sodio disueltos. La separación se lleva a cabo mediante sedimentación. El efluente del lavado se combina con el procedente del lavador de heces, conformando la solución débil que se utiliza para disolver el material que fue fundido en el horno de recuperación.

Horno de cal. La incineración del carbonato de calcio para producir cal, es uno de los procesos más antiguos que se conocen. La cal se calcina con frecuencia en un horno giratorio, aunque se utilizan también calcinadores de lecho fluido. Para mantener la temperatura del horno entre 1,100 y 1,250° C, generalmente se utiliza petróleo o gas natural. Se requiere dicha energía para evaporar el agua residual y para generar el calor de reacción necesario para la disociación:



3.2.3 Proceso de fabricación de papel

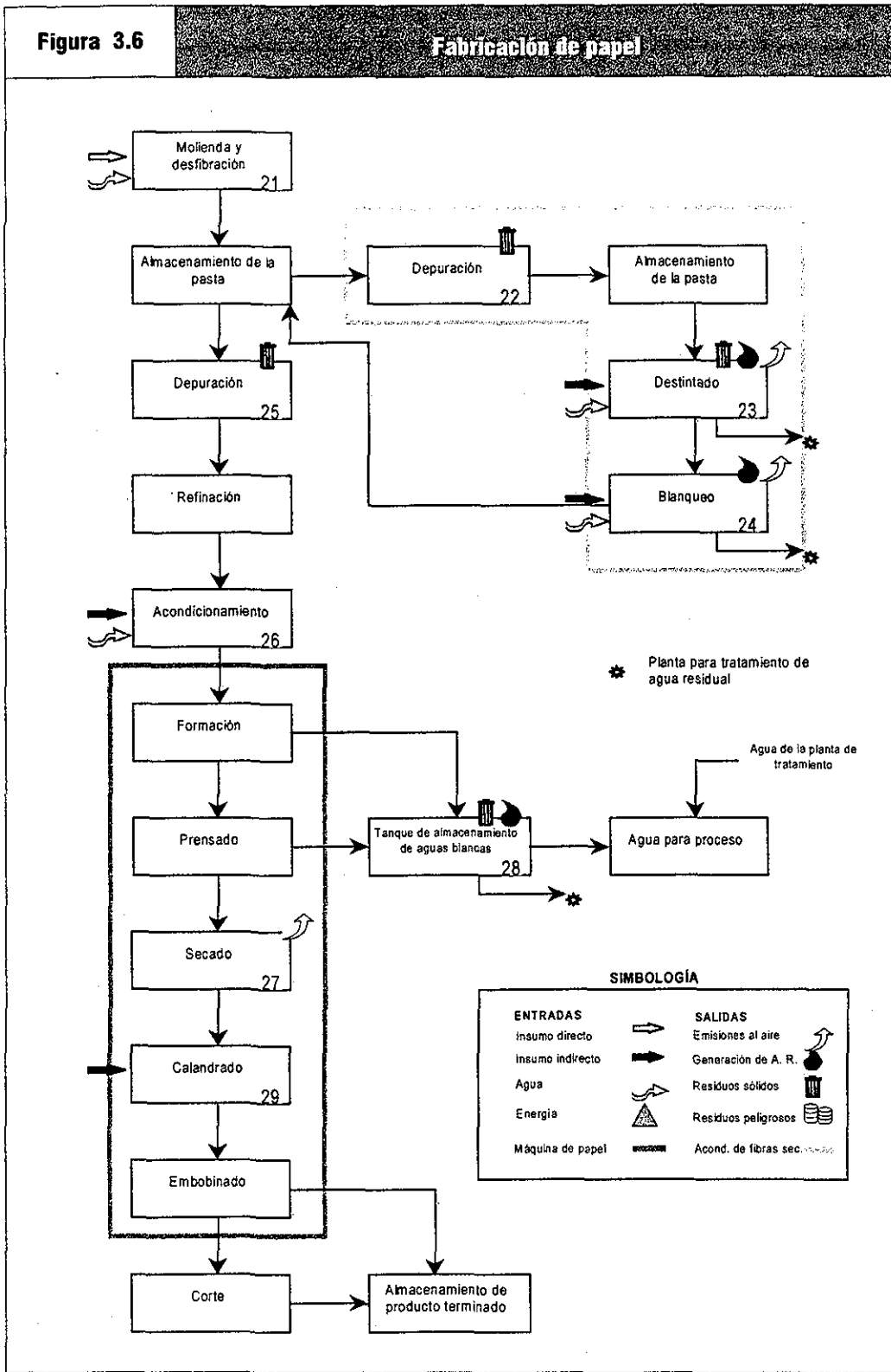
El proceso se lleva a cabo en dos grandes áreas, la primera se refiere a la preparación de la pasta y la segunda a la formación del papel propiamente dicha.

Dependiendo, tanto del grado de integración productiva de la industria (astillado, producción de pulpa y manufactura del papel), como del tipo de papel a elaborar, las fibras se reciben en suspensión o como pliegos. Los pliegos registran generalmente un contenido de humedad cercano al 10%, razón por la cual previamente deben hidratarse mediante pulpeo (CNICP, 2000a).

El proceso de fabricación de papel se resume en la figura 3.6; al igual que los diagramas anteriores, se incluyen los posibles puntos de generación y/o emisión de contaminantes (emisiones al aire, descargas de agua residual y generación de residuos sólidos y peligrosos).

Preparación de la pasta

Molienda y desfibración. Las fibras deben sujetarse a tratamiento mecánico antes de que puedan convertirse en papel. El tratamiento puede aplicarse de varias maneras; ordinariamente incluye una acción de machacamiento, frote o aplastamiento de las fibras. El batido es probablemente el proceso más importante en la preparación de la pasta (Casey, 1991). El papel hecho a partir de pasta sin batir es bajo en resistencia, contiene pelusa, es poroso e inapropiado para la mayoría de usos; en tanto que el papel hecho a base de pasta batida es resistente, denso y de textura rígida (Libby, 1979).



FUENTE: Adaptación libre de INE (2000a) y Bryce (1991).

TESIS COP
FALLA DE ORIGEN

El tiempo de batido proporcionará las características requeridas de acuerdo al tipo de papel fabricado. Cabe mencionar que esta operación es imprescindible en papeleras cuya principal fuente de fibra es material recuperado o bien en aquéllas no integradas a plantas de pulpa.

Depuración. La materia fibrosa, cuando se compone por material de desperdicio, puede estar contaminada con sólidos indeseables: arena, pedacería de vidrio, plásticos, grapas, clavos, alambre, etc.; dichos materiales deben ser removidos de la pasta. Su eliminación se realiza en tres, cuatro o más pasos, combinando diversos métodos como: centrifugación (en ciclones), cribado vibratorio a presión atmosférica, cribado a presión combinado con acción giratoria, etc. Las combinaciones y disposiciones que se aplican son múltiples, habiendo siempre depuración gruesa y fina, de alta y baja consistencia (Casey, 1991).

Refinación. Consiste en someter la suspensión de fibras a un trabajo de fricción, mediante el cual se terminen de separar unas de otras y se "hidraten" y/o "fibrilen"¹⁴ incrementando sus puntos de unión y resistencia, al mismo tiempo que se uniformiza su longitud. Por regla general, los refinadores se usan primordialmente para cortar fibras pero también pueden usarse para aumentar el tiempo de batido.

Acondicionamiento. Esta etapa engloba la adición de encolantes, cargas, rellenos y aditivos especiales. Durante esta operación se modifican las propiedades y características de la pasta con productos químicos como: colofonia¹⁵, diversos hidrocarburos, ceras naturales, almidones, silicato de sodio, cola, caseína, resinas sintéticas y látex de caucho; que comúnmente son llamadas sustancias de apresto (INE, 2000a).

Entre los encolantes más utilizados en México se encuentran las breas de colofonia, almidones modificados, carboximetilcelulosa y recientemente resinas sintéticas de urea-formaldehído o de melaminaformaldehído (INE, 2000a). En lo concerniente a las cargas, las más utilizadas son: silicatos (caolín, talco y asbestinas), carbonatos de calcio y magnesio, dióxido de titanio, tierras diatomáceas y, entre las más apreciadas, sulfuro de zinc y litopón (CNICP, 2000a).

Los rellenos son esencialmente los mismos materiales que las cargas; sin embargo, las cargas corresponden a los pigmentos blancos, en tanto que los rellenos son los pigmentos de color que se aplican para colorear el papel (Roberts, 1991).

Acondicionamiento de fibras secundarias

La producción de papel mediante fibras secundarias implica la necesidad de volver a producir pulpa con material de desperdicio. Este objetivo se puede conseguir por medios puramente mecánicos o con una combinación de procesos químicos y mecánicos.

¹⁴ Si la pasta para papel se observa al microscopio, cuando la fibra original se aflojan, ésta aparece como "escobillada" o fibrilada.

¹⁵ La colofonia esta constituida por un 90-95% de ácidos resinosos y un 5-10% de insaponificables. Su principal componente es una familia de ácidos tríciclicos llamados ácidos o resinas de colofonia; el ácido abiético es uno de ellos. La colofonia es el agente más usado para el encolado interno.

Todos los sistemas mecánicos implican el uso de un desbaratador que rompa los mazos o balas de papel; un dispositivo para eliminar la basura pesada; otro que elimine trapos, cuerdas y alambres; un sistema de cernido para retirar partículas de mayor tamaño y un separador centrifugo para las de menor dimensión (Libby, 1979). El objetivo es separar los contaminantes con un gasto mínimo de energía. En el acondicionamiento de fibras secundarias, las etapas de destintado y blanqueo conforman la parte química del proceso.

Destintado. Son dos los pasos básicos en la operación de destintado: 1) disolver o aflojar la tinta por métodos químicos y 2) eliminar la tinta presente en la pulpa mediante un lavado mecánico¹⁶. En general, todos los sistemas de destintado consisten en las siguientes etapas:

- ♦ Desbaratado o desfibrado en presencia de productos químicos
- ♦ Limpieza y depuración
- ♦ Lavado
- ♦ Eliminación del agua y espesado

Para destintar se utilizan frecuentemente hidróxido y carbonato de sodio. Sin embargo, en ocasiones se agregan agentes dispersantes como: jabones, aceites sulfonados, bentonita, metasilicato de sodio, benceno y otras sustancias en combinación con el álcali (INE, 2000a). Cuando se requiere producir pulpa blanca se aplican sistemas de blanqueo y lavado-blanqueo. Los lavadores típicos eliminan 85% de la tinta presente en el papel (Felton, 1991). El material destintado y lavado puede pasar por una etapa de blanqueo, utilizando alguno de los productos químicos mencionados anteriormente.

Formación de papel

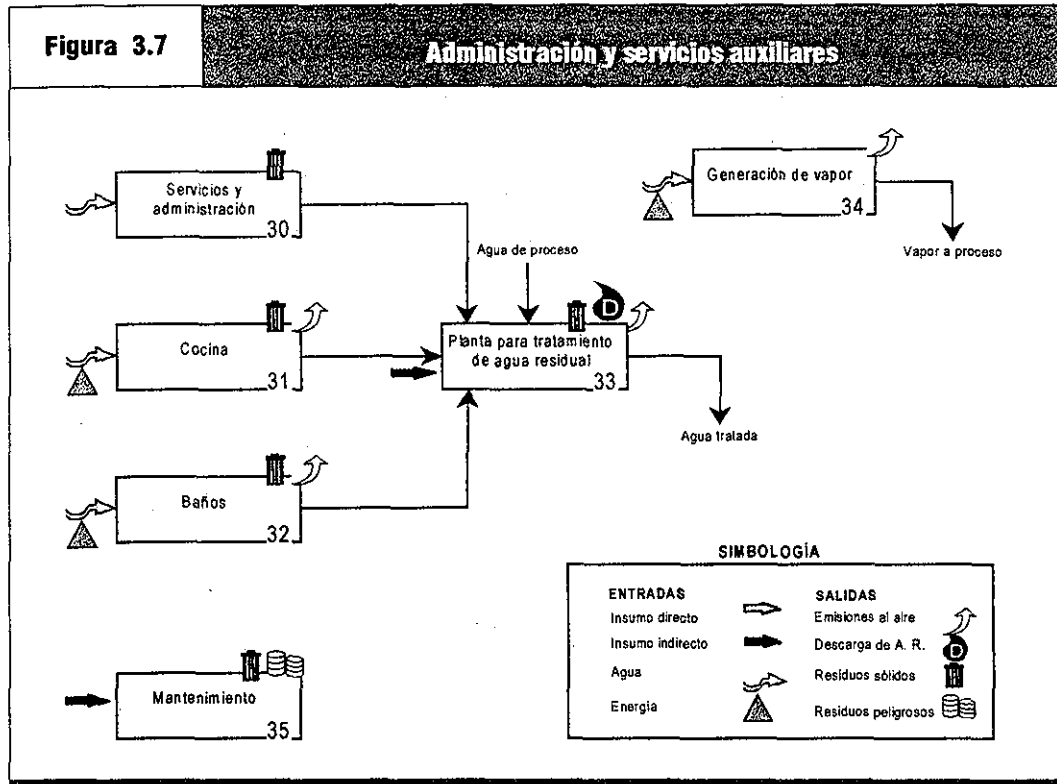
La pasta acondicionada se introduce en la máquina de papel con una consistencia entre 1 y 2% (Felton, 1991), en ella se suceden las etapas de formado, prensado, secado y calandrado; que tienen por objeto eliminar gradualmente el agua contenida en la lámina de papel y obtener un calibre específico o un acabado superficial (en el calandrado se puede realizar el encolado del papel). Finalmente, la lámina de papel o cartón se enrolla en bobinas o se corta en pliegos.

3.2.4 Servicios auxiliares

Además de los procesos presentados en los diagramas de operación y funcionamiento anteriores, la industria cuenta con servicios auxiliares que hacen posible su actividad y pueden generar contaminación. Dichos elementos son los que se describen en la figura 3.7.

Los diagramas de operación y funcionamiento fueron elaborados de acuerdo a las recomendaciones formuladas para el formato COA. La numeración que se observa corresponde a los puntos donde existen entradas (insumos directos e indirectos, agua, combustibles) y/o salidas (emisiones contaminantes). Mediante este enfoque se ha construido, con base en dichos diagramas, la tabla resumen que integra las entradas y salidas antes mencionadas (cuadro 3.8).

¹⁶ El lavado consiste en hacer pasar agua limpia a través de una torta compacta de pasta, misma que es adherida por succión a una malla, arrastrando con ello las partículas de tinta emulsificada.



FUENTE: Adaptación libre de INE, 2000a.

Cuadro 3.8 **Tabla resumen, fabricación de celulosa y papel**

Punto de emisión	Nombre del equipo, maquinaria o actividad	Entradas				Salidas			
		Insumo directo	Insumo indirecto	Agua	Combustibles	Gen. o emisión al aire	Gen. o descarga de agua residual	Generación, almacenamiento o transferencia	
								Residuos peligrosos	Residuos sólidos
FABRICACIÓN DE CELULOSA									
1	Descortezado	X		X			X		X
2	Astillado					X			X
3	Digestión	X							
4	Condensador					X	X		
5	Acumulador					X	X		
6	Lavado			X		X			
7	Limpieza y depuración								X
8	Espesado						X		
9	Blanqueo		X	X		X	X		
10	Secado de pulpa					X	X		
RECUPERACIÓN DE QUÍMICOS									
11	Aireación					X			
12	Evaporador de efecto múltiple					X	X		
13	Evaporador por contacto directo					X	X		
14	Horno de recuperación		X		X	X			
15	Tanque de disolución					X			
16	Lavador de sedimentos			X					
17	Filtro de sedimentos								X

Cuadro 3.8		Tabla resumen, fabricación de celulosa y papel (continuación)							
Punto de emisión	Nombre del equipo, maquinaria o actividad	Entradas				Salidas			
		Insumo directo	Insumo indirecto	Agua	Combustibles	Gen. o emisión al aire	Gen. o descarga de agua residual	Generación, almacenamiento o transferencia	
								Residuos peligrosos	Residuos sólidos
18	Horno de cal				X	X			
19	Reducción		X			X			
20	Lavador de cal			X					
FABRICACIÓN DE PAPEL									
21	Molienda y desfibración	X		X					
22	Depuración								X
23	Destintado		X	X		X	X		X
24	Blanqueo		X	X		X	X		
25	Depuración								X
26	Acondicionamiento		X	X					
27	Secado					X			
28	Tanque de alm. de aguas blancas						X		X
28	Calandrado		X						
ADMINISTRACIÓN Y SERVICIOS AUX.									
30	Servicios y administración			X					X
31	Cocina			X	X	X			X
32	Baños			X	X	X			X
33	Planta de tratamiento de A. R.		X			X	X		X
34	Generación de vapor			X	X	X			
35	Mantenimiento		X					X	X

La tabla resumen es esencial en el llenado del formato COA, ya que facilita el procesamiento de la información contenida en los diagramas de funcionamiento y la elaboración de estadísticas ambientales (INE, 2000a). Una vez que se han identificado las entradas y salidas del sistema (proceso productivo), el siguiente paso es determinar los contaminantes emitidos como resultado de su operación.

3.2.5 Emisiones contaminantes en la fabricación de celulosa y papel

A pesar de haber sido fundada hace más de un siglo, la industria de la celulosa y papel no ha logrado concebir un proceso ambientalmente aceptable. En su manufactura han predominado las sustancias cloradas como oxidantes y un elevado uso de agua. La producción de una tonelada de pulpa kraft blanqueada requiere alrededor de 120 m³ de agua, más de 20 árboles o 4.8 metros cúbicos de madera, y aproximadamente 1.2 megavatios / hora de electricidad. En su conjunto, ésta es la energía equivalente a la requerida para producir una tonelada de acero (WRM, 2000).

Emisiones al agua

Como se observó en los diagramas de operación y funcionamiento, el uso de agua en esta industria es múltiple: lavado de troncos, lavado de pulpa, solución de blanqueo, disolvente de aditivos, transporte de fibra de un proceso a otro y producción de vapor. No obstante, la generación de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

contaminantes tiene lugar, primordialmente, en las operaciones de digestión, blanqueo y destintado (CHHIS, 1999).

Aunque el residuo de la operación de digestión (licor negro) es manipulado para recuperar el sulfuro de sodio y la sosa cáustica, el agua remanente cuenta aún con una gran cantidad de contaminantes. En general, éstos se agrupan en: sólidos suspendidos, materia orgánica, extractos naturales de madera¹⁷, compuestos fenólicos y restos de álcali.

Los ácidos resinosos (principalmente abiético y dihidroxiabiético) y ácidos grasos (principalmente oleico, linoleico y linolénico) se encuentran naturalmente en las coníferas (*softwood*) utilizadas para fabricar pulpa. Estas sustancias pueden acumularse en concentraciones subletales en tejidos de peces, moluscos y crustáceos (CHHIS, 1999).

En la operación de blanqueo predominan las sustancias cloradas como oxidantes; en Estados Unidos algunas industrias celulósico-papeleras continúan utilizando: gas cloro (Cl_2), hidróxido de sodio (NaOH) y dióxido de cloro (ClO_2), en etapas alternadas para eliminar la lignina remanente de las fibras (USEPA, 1995). Comúnmente se requiere de 50 a 80 kg de cloro para blanquear una tonelada de pulpa; aproximadamente 10% de éste se combinará con moléculas orgánicas de fibra, generando miles de compuestos conocidos como organoclorados (Stanley, 1996).

Hasta el momento se han identificado alrededor de 300 compuestos organoclorados (incluyendo guayacoles, fenoles y catecoles clorados), se cree que éstos conforman sólo el 10% del total presente en la descarga de una productora de pulpa (Odriozola, 1997).

Muchos organoclorados resisten la degradación natural, acumulándose a través del tiempo en el ambiente. Se ha estimado que alrededor de la mitad de los organoclorados emitidos desde 1940, por industrias productoras de pulpa a las orillas del Mar Báltico, continúan presentes en los sedimentos de la región (Johnston et al., 1996).

Las industrias papeleras son la principal fuente de organoclorados al agua a nivel mundial (USEPA, 1990). Entre los organoclorados identificados hasta ahora existen numerosos compuestos cancerígenos y mutagénicos. La USEPA ha estimado que, para la gente que consume pescado capturado río abajo de la descarga de una papelera que blanquea con cloro, el riesgo de contraer cáncer es de 1 en 50 personas (USEPA, 1990).

Además, en el efluente de las plantas de blanqueo se han identificado dioxinas y furanos. Estos compuestos son químicamente similares a los organoclorados pero cuentan con un mayor grado de toxicidad y persistencia, además de ser considerados como cancerígenos (NIEHS, 2001). Se han detectado dioxinas y furanos en el agua de proceso y en los productos de papel¹⁸ (Rappe, 1990). Se estima que durante 1997, en Estados Unidos el sector de pulpa y papel fue responsable del 94% de las descargas de dioxinas y furanos al agua, representando el 3% del total emitido a los distintos medios (CCA, 1998).

¹⁷ Terpenos, taninos, ácidos resinosos y ácidos grasos, entre otros.

¹⁸ Se han encontrado dioxinas en papel de cigarrillos, pañales, filtros de café y cartones de leche.

Finalmente, las emisiones contaminantes generadas durante la fabricación de papel incluyen sustancias utilizadas en el acondicionamiento de fibras (encolantes, cargas y rellenos) y residuos de la operación de destintado (álcali no gastado, encolantes y tinta).

Emisiones al aire

Los gases malolientes emitidos durante el proceso kraft se identifican fácilmente. Durante la producción son liberadas cantidades variables de ácido sulfhídrico, mercaptano de metilo y varios sulfuros orgánicos como sulfuro de dimetilo y disulfuro de dimetilo; compuestos que se conocen en forma colectiva como azufre total reducido (TRS, del inglés: Total Reduced Sulphur) (CNMA, 1999).

Existen también emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), azufre (SO_x) y carbono, siendo las principales fuentes el horno de recuperación, el horno de cal y el tanque de disolución de la materia purificada. Por último, en el horno de recuperación se tienen emisiones de partículas, conformadas en su mayor parte por sulfato de sodio, Na₂SO₄; carbonato de sodio, Na₂CO₃; y cloruro de sodio, NaCl (Springer, 1991).

Residuos sólidos

La mayor parte de los residuos sólidos generados en las industrias de pulpa y papel consiste en restos de corteza y madera, lodo de tratamiento del agua residual, arena, sedimento de licor verde, cenizas del horno de recuperación y lodo proveniente de la etapa de destintado (Stanley, 1996).

A continuación se presenta un resumen (cuadro 3.9) que indica los puntos de generación y/o emisión de contaminantes (según los diagramas de operación y funcionamiento), su naturaleza genérica y el cuerpo receptor al cual se descargan. Dicho resumen se basa en información obtenida de la guía para el llenado de la COA del sector papelerero (INE, 2000a), descripciones compiladas por Casey (1991), información de EPA 560/4-88-00k (USEPA, 1988), 40CFR§430 (USEPA, 2000b) y de la guía técnica británica para el sector de pulpa y papel (Environment Agency, 2000).

Cuadro 3.9		Contaminantes que pueden ser emitidos durante la fabricación de pulpa y papel				
Punto de emisión	Nombre del equipo, maquinaria o actividad	Gen. o emisión al aire	Gen. o descarga de agua residual	Generación, almacenamiento o transferencia		Contaminantes
				Residuos peligrosos	Residuos sólidos	
1	Descortezado		X			Restos de corteza, ácidos resinosos, ácidos grasos, biocidas
					X	Lodo, corteza, astillas y pesticidas utilizados en las pilas de almacenamiento
2	Astillado	X				Polvo del astillado de madera
					X	Astillas fuera de especificación
4	Condensador	X				Azufre total reducido, ácidos grasos, ácidos resinosos, compuestos fenólicos y alcoholes
			X			Ácidos resinosos, ácidos grasos no saturados, compuestos fenólicos, azufre total reducido

Cuadro 3.9

Contaminantes que pueden ser emitidos durante la fabricación de pulpa y papel (continuación)

Punto de emisión	Nombre del equipo, maquinaria o actividad	Gen. o emisión al aire	Gen. o descarga de agua residual	Generación, almacenamiento o transferencia		Contaminantes
				Residuos peligrosos	Residuos sólidos	
5	Acumulador	X				Azufre total reducido, ácidos grasos, ácidos resinosos, compuestos fenólicos y alcoholes
			X			Ácidos resinosos, ácidos grasos no saturados, compuestos fenólicos, azufre total reducido
6	Lavado	X				Azufre total reducido
7	Limpieza y depuración				X	Partículas de madera, partículas de alquitrán, cascajo, sustancias metálicas e incrustaciones
8	Espesado		X			Ácidos resinosos, ácidos grasos no saturados, azufre total reducido
9	Blanqueo	X				Cloro, dióxido de cloro, clorato (ClO ₃), dioxinas y furanos, dióxido de azufre, cloroformo
			X			Ácidos resinosos clorados, compuestos fenólicos clorados, dioxinas, furanos, solución de blanqueo no gastada
10	Secado de pulpa	X				Partículas de fibra del secado de la pulpa
			X			Fibra residual
11	Aireación	X				Azufre total reducido
12	Evaporador de efecto múltiple	X				Azufre total reducido
			X			Azufre total reducido
13	Evaporador por contacto directo	X				Azufre total reducido
			X			Azufre total reducido
14	Horno de recuperación	X				Azufre total reducido, óxidos de nitrógeno, azufre y carbono, partículas de Na ₂ CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , carbón
15	Tanque de disolución	X				Azufre total reducido, óxidos de nitrógeno, azufre y carbono, partículas de Na ₂ CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , carbón
17	Filtro de sedimentos				X	Metales pesados y partículas finas de carbono, silicatos y aluminatos
18	Horno de cal	X				Azufre total reducido, óxidos de nitrógeno, azufre y carbono, partículas de CaCO ₃ , CaO, Na ₂ CO ₃
19	Reducción	X				Azufre total reducido
22	Depuración				X	Pedacera de vidrio, plásticos, grapas, clavos, alambre, arena
23	Destintado	X				Emisiones fugitivas de polvo, pérdidas de papel y olor
			X			Alcali no gastado, tinta, sustancias utilizadas para acondicionamiento de pulpa
					X	Lodo de destintado que contiene fibras, rellenos, basura, metales pesados
24	Blanqueo	X				Compuestos de cloro, en su mayoría hipoclorito
			X			Solución no gastada de blanqueo
25	Depuración				X	Partículas de madera, partículas de alquitrán, cascajo, sustancias metálicas e incrustaciones
27	Secado	X				Partículas generadas en la máquina de papel, compuestos orgánicos volátiles
29	Tanque de almacenamiento de aguas blancas		X			Sustancias biodegradables como fibras, PCP, sustancias utilizadas en el acondicionamiento de las fibras
					X	Lodos separados durante el tratamiento del agua blanca

Punto de emisión		Nombre del equipo, maquinaria o actividad		Gen. o emisión al aire	Gen. o descarga de agua residual	Generación, almacenamiento o transferencia		Contaminantes
						Residuos peligrosos	Residuos sólidos	
30	Serv. y administración						X	Residuos sólidos domésticos
31	Cocina	X					X	Oxidos de carbono, óxidos de azufre
32	Baños	X					X	Residuos de tipo orgánico
33	Planta de tratamiento de A. R.	X					X	Oxidos de carbono, óxidos de azufre
34	Generación de vapor	X						Residuos sólidos domésticos
35	Mantenimiento					X		Azufre total reducido
					X			Contaminantes remanentes
								Desperdicios de descortezado, lodos biológicos, lodos de lavado de troncos
								Azufre total reducido, óxidos de nitrógeno, azufre y carbono
								Aceites gastados
								Papel, madera, plástico, hule, chatarra de fierro

Como se observa, son numerosas las sustancias producidas durante el funcionamiento de una industria celulósico-papelera. En general, se puede decir que los contaminantes emitidos al agua incluyen: lignina disuelta, restos de celulosa, sólidos en suspensión, extractos de madera, compuestos orgánicos clorados, dioxinas, furanos, color, compuestos de azufre reducido y otros compuestos orgánicos volátiles (VOC, del inglés: Volatile Organic Compounds) como cloroformo.

En el capítulo siguiente se establecen las sustancias emitidas en cada punto, se define cuales están contenidas en la lista de sustancias RETC y se propone la metodología para su estimación.

Capítulo 4: Metodología de estimación

Anteriormente se han mencionado las ventajas de instrumentar metodologías para estimar indirectamente emisiones contaminantes al agua. La necesidad de crear dichos procedimientos radica en el carácter voluntario del reporte de las sustancias RETC y en que no todas las fuentes miden directamente sus descargas, a pesar de estar normada su medición.

Los métodos de estimación indirecta, presentados en el inciso 2.5, cuentan con ventajas y desventajas, técnicas y económicas, que deben ser consideradas para su aplicación. No obstante, el orden de preferencia es basado fundamentalmente en la confiabilidad de la estimación y la simplicidad de la técnica utilizada.

Por ejemplo, el uso de factores de emisión se prefiere al empleo de balances de materia, ya que los factores de emisión son obtenidos, generalmente, con base en análisis estadísticos y su aplicación sólo requiere de la variable que define el nivel de actividad de la fuente estimada; en contraste, los balances de materia necesitan una mayor cantidad de información y su empleo requiere personal calificado. Mediante este criterio se definió la jerarquización del INE para la elección de la técnica de estimación, misma que mostró en el cuadro 2.2.

Para elegir el método de estimación, primeramente se deben identificar las emisiones contaminantes a ser estimadas. En este capítulo se realiza la identificación de las sustancias que pueden ser emitidas durante el proceso de producción de pulpa y papel, y se propone el método de estimación más adecuado para cada una de ellas.

4.1 Identificación de sustancias emitidas

El proceso de conversión de madera en pulpa para papel emite un gran número de compuestos al agua, éstos se encuentran incluidos en una combinación de extractos naturales de madera y productos secundarios clorados (Environment Canada, 2000). Suntio y colaboradores (1988), publicaron una compilación de alrededor de 250 sustancias identificadas, donde 180 de ellas corresponden a compuestos orgánicos clorados incluyendo: dioxinas, furanos, fenoles, catecoles, guayacoles y siringoles; que en su conjunto, representan el mayor problema de contaminación al agua ocasionado por esta actividad industrial (FEA, 1997).

En el cuadro 4.1 se integra una lista de las sustancias consideradas como preocupantes para esta industria, dicho listado se elaboró a partir de los siguientes documentos: Permit Guidance Document, Pulp, Paper and Paperboard Manufacturing, Point Source Category (USEPA, 2000b); Technical Guidance for the Pulp and Paper Sector (Environment Agency, 2000); Developing Water Quality Guidelines for Chemicals of Concern From Pulp Mill Effluent (Environment Canada, 2000) y las descripciones compiladas por Casey (1991).

Además, se incluye la clave asignada para cada sustancia (número CAS, del inglés: Chemical Abstract Service) y se indica cuales se encuentran contenidas en el listado del RETC¹. El número de punto de emisión, es el definido en los diagramas de operación y funcionamiento presentados en las figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6.

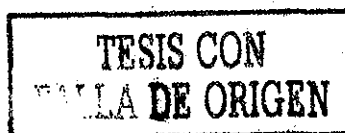
Cuadro 4.1		Identificación de sustancias emitidas al agua durante la fabricación de pulpa tipo kraft y papel		
Punto de emisión	Fuente	Tipo de emisión	Sustancia	Clave
1	Descortezado	Ácidos resinosos	Abiótico	514-10-3
			Dihidroxiabiótico	1740-19-3
			Neoabiótico	471-77-2
			Pimárico	127-27-5
			Isopimárico	5835-26-7
			Sandaracopimárico	23527-10-8
			Palústrico	1945-53-5
		Ácidos grasos	Oleico	112-80-1
			Linoleico	-
			Linolénico	-
			Palmítico	57-10-3
		Biocidas	Sustancia activa	-
		4	Condensador	Ácidos resinosos
Dihidroxiabiótico	1740-19-3			
Neoabiótico	471-77-2			
Pimárico	127-27-5			
Isopimárico	5835-26-7			
Sandaracopimárico	23527-10-8			
Palústrico	1945-53-5			
Ácidos grasos	Oleico			112-80-1
	Linoleico			-
	Linolénico			-
	Palmítico			57-10-3
Azufre total reducido				-
5	Acumulador			Ácidos resinosos
		Dihidroxiabiótico	1740-19-3	
		Neoabiótico	471-77-2	
		Pimárico	127-27-5	
		Isopimárico	5835-26-7	
		Sandaracopimárico	23527-10-8	
		Palústrico	1945-53-5	
		Ácidos grasos	Oleico	112-80-1
			Linoleico	-
			Linolénico	-
			Palmítico	57-10-3
		Azufre total reducido		-
		8	Espesado	Ácidos resinosos
Dihidroxiabiótico	1740-19-3			
Neoabiótico	471-77-2			
Pimárico	127-27-5			
Isopimárico	5835-26-7			
Sandaracopimárico	23527-10-8			
Palústrico	1945-53-5			

¹ La lista de sustancias se encuentra en el Anexo 1.

Cuadro 4.1		Identificación de sustancias emitidas al agua durante la fabricación de pulpa tipo kraft y papel (continuación)		
Punto de emisión	Fuente	Tipo de emisión	Sustancia	Clave
8	Espesado	Ácidos grasos	Oleico	112-80-1
			Linoleico	-
			Linolénico	-
			Palmitico	57-10-3
		Azufre total reducido		
9	Blanqueo	Dioxinas	2,3,7,8 TCDD, tetracloro dibenzo-p-dioxina *	1746-01-6
		Furanos	2,3,7,8 TCDF, tetracloro dibenzo furano *	51207-31-9
		Compuestos fenólicos clorados	6-clorovanillin	-
			Triclorosiringol	-
			4,5-diclorocatecol	-
			3,4,5-Triclorocatecol	-
			3,4,6-Triclorocatecol	-
			4,5-dicloroguayacol	-
			3,4,5-Tricloroguayacol	57057-83-7
			3,4,6-Tricloroguayacol	-
			4,5,6-Tricloroguayacol	2668-24-8
			2,4,5-Triclorofenol *	95-95-4
		2,4,6-Triclorofenol *	88-06-2	
		Tetraclorocatecol	-	
		Tetracloroguayacol	2539-17-5	
		2,3,4,6-Tetraclorofenol *	58-90-2	
Pentaclorofenol *	87-86-5			
AOX	-			
Ácidos resinosos clorados	12-Clorodihidroabiético	-		
	14-Clorodihidroabiético	-		
	12,14-Diclorodehidroabiético	57055-39-7		
Compuestos orgánicos volátiles	Cloroformo *	67-66-3		
10	Secado de pulpa	Fibra residual		-
12	Evaporador de efecto múltiple	Azufre total reducido		-
13	Evaporador por contacto directo	Azufre total reducido		-
23	Destintado	Metales pesados	Arsénico*	7440-38-2
			Cadmio*	7440-43-9
			Cobre*	7440-50-8
			Cromo*	7440-47-3
			Mercurio*	7439-97-6
			Niquel *	7440-02-0
			Plomo*	7439-92-1
			Zinc *	7440-66-6
Compuestos fenólicos clorados	Pentaclorofenol *	87-86-5		
24	Blanqueo	Solución no gastada de blanqueo		-
28	Tanque de alm. de aguas blancas	Material suspendido y disuelto		-
33	Planta de tratamiento de aguas residuales	Contaminantes remanentes		-

* Sustancias contenidas en la lista RETC.

FUENTE: USEPA (2000b), Environment Agency (2000), Environment Canada (2000) y Casey (1991).



Una vez identificadas las sustancias emitidas, se debe elegir el mejor método para su estimación. La elección se realizó respetando el orden de preferencia establecido por el INE; sin embargo, se presentaron las siguientes restricciones para la aplicación de las técnicas propuestas:

- No se cuenta con factores de emisión para las sustancias listadas.
- Se carece de datos históricos, de emisiones contaminantes, para la aplicación de la técnica de extrapolación.
- Las reacciones que se producen durante el proceso analizado son complejas y no se encuentran caracterizadas, por lo que no se pueden realizar balances de materia.
- A excepción de biocidas, no existen modelos matemáticos para la estimación de las sustancias listadas.

Los esfuerzos de algunas agencias ambientales como la USEPA o Environment Canada se han concentrado en la determinación de intervalos probables de emisión para dichas sustancias, basados en mediciones realizadas en sus industrias kraft. Estos valores pueden ser utilizados, a través del llamado *cálculo de ingeniería*, para determinar la emisión de contaminantes en las industrias mexicanas, quedando la confiabilidad de los métodos propuestos sujeta a la evaluación y calibración de estos valores de estimación para México.

La confiabilidad de la información es el factor determinante en la estimación de emisiones, puesto que los valores utilizados tienen un efecto directo en el nivel de confianza de los resultados obtenidos (Environment Canada, 1993). Para determinar la confiabilidad de los datos utilizados, y por ende de la metodología de estimación propuesta, se ha decidido utilizar el siguiente criterio.

4.2 Confiabilidad de la información

La confiabilidad de los valores de estimación propuestos depende fundamentalmente de la metodología utilizada en su determinación. Estos valores pueden estar solidamente sustentados y contar con alta confiabilidad, o provenir de estudios poco detallados y ser utilizados bajo circunstancias restringidas.

Para determinar la confiabilidad de la metodología es necesario establecer un sistema que facilite su calificación. El criterio que se maneja (cuadro 4.2), es equivalente al desarrollado por el Instituto de Ciencias del Océano y Pesca de Canadá (adoptado por Environment Canada para jerarquizar su información), y al empleado por USEPA para definir la confiabilidad de los factores de emisión. Mediante este criterio se determina el llamado "factor de aplicabilidad".

El factor asignado a cada método de estimación resulta de considerar todos los componentes utilizados por el método, quedando establecido dicho factor por el "eslabón más débil", ya que la calidad del método no puede ser mejor que la peor calificación obtenida por sus componentes. El factor de aplicabilidad se determinó según las características que se muestran en el cuadro 4.2.

Cabe aclarar que la falta de estándares de referencia² ocasiona que la jerarquización del cuadro 4.2 no se pueda considerar absoluta, es decir, 3 no es mejor que 4 en cualquier caso. Por ejemplo, el nivel 4 "potencialmente exacto y preciso" y el nivel 3 "potencialmente preciso pero de exactitud desconocida" no definen, en el caso de compuestos a niveles traza, cuál tiene mayor aplicabilidad.

En principio, métodos de estimación catalogados con 4 pueden ser comparados con otros de igual clasificación; en tanto que aquellos especificados con 3 se consideran internamente consistentes y pueden ser usados para establecer tendencias (Environment Canada, 1993).

Cuadro 4.2	Criterio de confiabilidad y factor de aplicabilidad	
Característica de la información	Confiabilidad del método	Factor de aplicabilidad
Se consideran los datos incorrectos; el reporte contiene errores obvios. Uso limitado.	Baja	0.4 – 0.6
Los datos son poco confiables por estar pobre o dudosamente definida la metodología. Los patrones o tendencias obtenidos probablemente no son reales. Uso bajo circunstancias restringidas.	Debajo del promedio	0.5 – 0.7
La información contenida en el reporte es insuficiente para evaluar su calidad. Las tendencias probablemente son reales. Bajo nivel de confianza en la estimación.	Promedio	0.6 – 0.8
Los datos son internamente consistentes, los patrones o tendencias son probablemente reales; sin embargo, comparaciones con otras muestras pueden ser difíciles. Potencialmente preciso pero de exactitud desconocida, se pueden establecer tendencias.	Arriba del promedio	0.7 – 0.9
Los datos son internamente consistentes, han sido comparados con estándares de referencia. Se permite su comparación con otros datos. Potencialmente exacto y preciso, se pueden realizar estimaciones confiables.	Excelente	0.8 – 1.0

El desglose de las consideraciones asumidas se presenta en los incisos siguientes, donde además se destaca la importancia de determinar las emisiones de dichos compuestos. En el cuadro 4.3 se resume la metodología de estimación propuesta para las sustancias listadas, la información necesaria para cada estimación y se indica cuales son los factores que influyen en la emisión de cada una de ellas.

4.3 Ácidos resinosos

Los ácidos resinosos se encuentran principalmente en especies de madera blanda como pino y abeto (*softwood*), constituyendo de 0.8 a 2% del peso total de la madera (Thoms, 2000). Son identificados como tóxicos para la vida acuática (Taylor et al., 1988; Springer, 1991 y Environment Canada, 1997), considerándose al ácido abiético como el irritante más potente de los generados por la madera de pino (Johnston, 1995). Además, se ha demostrado que algunos son cancerígenos y mutagénicos (CHHS, 1999). En el cuadro 4.4 se presentan las CL₅₀ (concentración letal que produce 50% de mortalidad en los organismos analizados) a 96h, obtenidas para salmón.

² De acuerdo con Environment Canada (1993), no existen aún estándares de referencia para la industria del papel, que corroboren los valores reportados cuando se trata de compuestos a niveles traza, como la mayoría que los listados en el cuadro 4.1.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuadro 4.4 Cálculo de emisiones de la producción de pulpa kraft y papel

Punto de emisión	Sustancia	Información requerida										Emisión media	Expresión general	
		Tipo de proceso	Tipo de materia prima	Consumo de agua	Blanqueo convencional	Blanqueo ECF o TCF	Pérdida de pulpa por blanqueo	Producción	Tratamiento del efluente	Generación de lodo de trat.				
		ESTIMACIÓN DE ÁCIDOS RESINOSOS A PARTIR DE PRODUCCIÓN										g/ADt		
	Abiético	X	X				X	X	X	X			9.49	$E_{AR} = \left[\frac{\text{Emisión media en g/ADt}}{(1-0.80)} \right] (1-N_1) X (\text{producción en ADt/año})$ <p> E_{AR} = emisión de ácido resinoso en gramos por año N_1 = eficiencia de remoción del sistema de tratamiento ♦ Los ácidos resinosos son estimados para el efluente final; por tanto, la expresión mostrada engloba las emisiones de los puntos 1, 4, 5 y 8. ♦ La emisión media corresponde a los intervalos del cuadro 4.6, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.8, descritas en el inciso 4.3. </p>
	Dihidroxiabiético	X	X				X	X	X			9.31		
	Neoabiético	X	X				X	X	X			1.82		
	Pimánico	X	X				X	X	X			2.06		
	Isopimánico	X	X				X	X	X			10.39		
	Sandaracopimánico	X	X				X	X	X			6.22		
	Pallústrico	X	X				X	X	X			4.32		
		ESTIMACIÓN DE ÁCIDOS RESINOSOS A PARTIR DE CONSUMO DE AGUA										µg/l		
	Abiético	X	X	X									92.7	$E_{AR} = \left[\frac{\text{Emisión media en µg/l}}{(1-0.80)} \right] (1-N_1) X (\text{consumo de agua en l/año})$ <p> E_{AR} = emisión de ácido resinoso en microgramos por año N_1 = eficiencia de remoción del sistema de tratamiento ♦ Los ácidos resinosos son estimados para el efluente final; por tanto, la expresión mostrada engloba las emisiones de los puntos 1, 4, 5 y 8. ♦ La emisión media corresponde a los intervalos del cuadro 4.6, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.8, descritas en el inciso 4.3. </p>
	Dihidroxiabiético	X	X	X									90.9	
	Neoabiético	X	X	X									17.8	
	Pimánico	X	X	X									20.1	
	Isopimánico	X	X	X									101.4	
	Sandaracopimánico	X	X	X									60.7	
	Pallústrico	X	X	X									42.2	

ADt = tonelada de pulpa secada al aire

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Cálculo de emisiones de la producción de pulpa kraft y papel (continuación)												
Punto de emisión	Sustancia	Información requerida						Emisión media	Expresión general			
		Tipo de proceso	Tipo de materia prima	Consumo de agua	Blanqueo convencional	Blanqueo ECF o TCF	Pérdida de pulpa por blanqueo			Producción	Tratamiento del efluente	Generación de lodo de trat.
1, 4, 5, 8	ESTIMACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS A PARTIR DE PRODUCCIÓN											
	Oleico	X	X			X	X	X	X		0.80	$E_{AG} = \left[\frac{\text{Emisión media en g/ADt}}{(1 - 0.80)} \right] (1 - N_1) \times \text{producción en ADt/año}$ <p>E_{AG} = emisión de ácido graso en gramos por año N_1 = eficiencia de remoción del sistema de tratamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> Los ácidos grasos son estimados para el efluente final; por tanto, la expresión mostrada engloba las emisiones de los puntos 1, 4, 5 y 8. La emisión media corresponde a los intervalos del cuadro 4.9, mismos que son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.10, descritas en el inciso 4.4.
	Linoleico	X	X			X	X	X	X		0.83	
	Linolénico	X	X			X	X	X	X		3.56	
Palmitico	X	X			X	X	X	X		3.69		
1, 4, 5, 8	ESTIMACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS A PARTIR DE CONSUMO DE AGUA											
	Oleico	X	X	X	X				X		7.8	$E_{AG} = \left[\frac{\text{Emisión media en } \mu\text{g/l}}{(1 - 0.80)} \right] (1 - N_1) \times \text{consumo de agua en l/año}$ <p>E_{AG} = emisión de ácido graso en microgramos por año N_1 = eficiencia de remoción del sistema de tratamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> Los ácidos grasos son estimados para el efluente final; por tanto, la expresión mostrada engloba las emisiones de los puntos 1, 4, 5 y 8. La emisión media corresponde a los intervalos del cuadro 4.9, mismos que son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.10, descritas en el inciso 4.4.
	Linoleico	X	X	X	X				X		8.1	
	Linolénico	X	X	X	X				X		34.7	
Palmitico	X	X	X	X				X		36.0		

Cuadro 4.4 Cálculo de emisiones de la producción de pulpa kraft y papel (continuación)												
Punto de emisión	Sustancia	Información requerida						Emisión media	Expresión general			
		Tipo de proceso	Tipo de materia prima	Consumo de agua	Blanqueo convencional ECF o TCF	Pérdida de pulpa por blanqueo	Producción			Tratamiento del efluente	Generación de lodo de trat.	
1	ESTIMACIÓN DE BIOCIDAS A PARTIR DE SU CONSUMO											
	Sustancia activa								X		mg/l	$E_{LM} = (Cf \text{ en mg/l}) \times (\text{consumo de agua en l/año})$ <p> E_{LM} = emisión de la sustancia activa Cf = Concentración final de la sustancia activa </p> <ul style="list-style-type: none"> La concentración final se determinará mediante el modelo PEC, que se presenta en el cuadro 4.11. Las consideraciones asumidas se muestran en el cuadro 4.12 y se describen en el inciso 4.5.
4, 5, 8, 12, 13	ESTIMACIÓN DE AZUFRE TOTAL REDUCIDO											
	Azufre total reducido											No se propone método de estimación para azufre total reducido, mayor detalle en el inciso 4.11.
6	ESTIMACIÓN DE DIOXINAS Y FURANOS EN PULPA BLANQUEADA											
	2,3,7,8 TCDD, tetracloro dibenzo-p-dioxina	X			X	X	X	X	X	X	µg/ADT	$E_{DF} = (\text{Emisión media en } \mu\text{g/ADT}) \times (\text{producción de pulpa en AD/año})$ <p> E_{DF} = emisión de dioxinas o furanos en microgramos por año, para pulpa blanqueada </p> <ul style="list-style-type: none"> La emisión media corresponde a los intervalos del cuadro 4.13, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.14, descritas en el inciso 4.6.
	2,3,7,8 TCDF, tetracloro dibenzo furano	X			X	X	X	X	X	X	18	
											0.5	

Cálculo de emisibles de la producción de pulpa kraft y papel (continuación)												
Punto de emisión	Sustancia	Información requerida							Emisión media	Expresión general		
		Tipo de proceso	Tipo de materia prima	Consumo de agua	Blanqueo convencional	Blanqueo ECF o TCF	Pérdida de pulpa por blanqueo	Producción			Tratamiento del efluente	Generación de lodo de trat.
9	ESTIMACIÓN DE DIOXINAS Y FURANOS EN LODO DE TRATAMIENTO											
	2,3,7,8 TCDD, tetracloro dibenzo-p-dioxina	X			X				X	X	63	$E_{of} = (\text{Emisión media en } \mu\text{g/l})(\text{producción de lodo en t/año})$ <p>E_{of} = emisión de dioxinas o furanos en microgramos por año, para lodo de tratamiento</p> <p>♦ La emisión media corresponde a los intervalos del cuadro 4.13, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.14, descritas en el inciso 4.6.</p>
	2,3,7,8 TCDF, tetracloro dibenzo furano	X			X				X	X	0.5	
											3	
ESTIMACIÓN DE DIOXINAS Y FURANOS EN AGUA TRATADA												
	2,3,7,8 TCDD, tetracloro dibenzo-p-dioxina	X		X	X				X		42	$E_{of} = \left[\frac{\text{Emisión media en pg/l}}{(1 - 0.78)} \right] (1 - N_1) (\text{consumo de agua en t/año})$ <p>E_{of} = emisión de dioxinas o furanos en picogramos por año para agua tratada</p> <p>N_1 = eficiencia de remoción del sistema de tratamiento</p> <p>♦ La emisión media corresponde a los intervalos del cuadro 4.13, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.14, descritas en el inciso 4.6.</p>
	2,3,7,8 TCDF, tetracloro dibenzo furano	X		X	X				X		5.5	
		X		X	X				X		120	
		X		X	X				X		5.5	

Cuadro 4.4 Cálculo de emisiones de la producción de pulpa kraft y papel (continuación)														
Punto de emisión	Sustancia	Información requerida						Emisión media	Expresión general					
		Tipo de proceso	Tipo de materia prima	Consumo de agua	Blanqueo convencional	Blanqueo ECF o TCF	Perdida de pulpa por blanqueo			Producción	Tratamiento del efluente	Generación de lodo de trat.		
9	ESTIMACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS CLORADOS A PARTIR DE PRODUCCIÓN; BLANQUEO CONVENCIONAL													
		3,4,5-tricloroguayacol	X			X	X	X	X	X			5.945	$E_{FC} = \left[\frac{\text{Emisión media en g/ADT}}{(1-0.50)} \right] (1-N_1) (\text{producción en ADT/año})$ <p> E_{FC} = emisión del compuesto fenólico clorado en gramos por año N₁ = eficiencia de remoción del sistema de tratamiento ♦ La emisión media corresponde a los intervalos del cuadro 4.17, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.20, descritas en el inciso 4.7. </p>
		3,4,6-tricloroguayacol	X			X	X	X	X	X			1.174	
		4,5,6-tricloroguayacol	X			X	X	X	X	X			1.232	
		2,4,6-triclorofenol	X			X	X	X	X	X			0.986	
		Tetraclorocatecol	X			X	X	X	X	X			3.596	
		Tetracloroguayacol	X			X	X	X	X	X			6.423	
		2,3,4,6-tetraclorofenol	X			X	X	X	X	X			0.362	
		Pentaclorofenol	X			X	X	X	X	X			0.159	

Cálculo de emisiones de la producción de pulpa kraft y papel (continuación)															
Punto de emisión	Sustancia	Información requerida										Emisión media	Expresión general		
		Tipo de proceso	Tipo de materia prima	Consumo de agua	Blanqueo convencional ECF o TCF	Blanqueo ECF o TCF	Pérdida de pulpa por blanqueo	Producción	Tratamiento del efluente	Generación de lodo de trat.					
9	ESTIMACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS CLORADOS A PARTIR DE PRODUCCIÓN; BLANQUEO ECF o TCF														
	6-clorovanilín	X				X	X	X	X	X	X	X	X	355.58	$E_{FC} = \left[\frac{\text{Emisión media en mg/ADt}}{(1-0.50)} \right] (1-N_i X \text{ producción en ADt/año})$ <p> E_{FC} = emisión del compuesto fenólico clorado en miligramos por año N_i = eficiencia de remoción del sistema de tratamiento La emisión media corresponde a los intervalos del cuadro 4.18, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.20, descritas en el inciso 4.7. </p>
	3,4,5-triclorosyringol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	0.489	
	4,5-diclorocatecol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	1.845	
	3,4,5-triclorocatecol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	0.748	
	3,4,6-triclorocatecol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	0.614	
	4,5-dicloroguayacol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	3.628	
	3,4,5-tricloroguayacol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	0.584	
	3,4,6-tricloroguayacol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	0.276	
	4,5,6-tricloroguayacol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	0.635	
	2,4,5-triclorofenol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	0.614	
	2,4,6-triclorofenol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	2.684	
	Tetraclorocatecol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	1.424	
	Tetracloroguayacol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	0.502	
2,3,4,6-tetraclorofenol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	0.502		
Pentaclorofenol	X				X	X	X	X	X	X	X	X	0.717		

Cálculo de emisiones de la producción de pulpa kraft y papel (continuación)													
Cuadro 4.4	Punto de emisión	Sustancia	Información requerida								Emisión media	Expresión general	
			Tipo de proceso	Tipo de materia prima	Consumo de agua	Blanqueo convencional	Blanqueo ECF o TCF	Pérdida de pulpa por blanqueo	Producción	Tratamiento del efluente			Generación de lodo de trat.
ESTIMACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS CLORADOS A PARTIR DE CONSUMO DE AGUA; BLANQUEO CONVENCIONAL													
6		3,4,5-tricloroguaiacol	X		X	X				X		41,000	$E_{FC} = \left[\frac{\text{Emisión media en ng/l}}{(1-0.50)} \right] (1-N_1) (\text{consumo de agua en l/año})$ <p> <i>E_{FC}</i> = emisión del compuesto fenólico clorado en nanogramos por año <i>N₁</i> = eficiencia de remoción del sistema de tratamiento ♦ La <i>emisión media</i> corresponde a los intervalos del cuadro 4.17, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.20, descritas en el inciso 4.7. </p>
		3,4,6-tricloroguaiacol	X		X	X				X		8,100	
		4,5,6-tricloroguaiacol	X		X	X				X		8,500	
		2,4,6-triclorofenol	X		X	X				X		6,800	
		Tetraclorocatecol	X		X	X				X		24,800	
		Tetracloroguaiacol	X		X	X				X		44,300	
	2,3,4,6-tetraclorofenol	X		X	X				X		2,500		
	Pentaclorofenol	X		X	X				X		1,100		

Cuadro 4.4 Cálculo de emisiones de la producción de pulpa kraft y papel (continuación)																
Punto de emisión	Sustancia	Información requerida							Emisión media kg/ADT	Expresión general						
		Tipo de proceso	Tipo de materia prima	Consumo de agua	Blanqueo convencional	Blanqueo ECF o TCF	Pérdida de pulpa por blanqueo	Producción			Tratamiento del efluente	Generación de lodo de trat.				
ESTIMACIÓN DE AOX, A PARTIR DE PRODUCCIÓN																
9	AOX	X			X		X	X	X	X					$E_{AOX} = \left[\frac{\text{Emisión media en kg/ADT}}{(1 - 0.50)} \right] (1 - N_1) \times (\text{producción en AD/año})$ <p>E_{AOX} = emisión del indicador AOX en kilogramos por año N_1 = eficiencia de remoción del sistema de tratamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> La emisión media corresponde a los intervalos de los cuadros 4.21 y 4.22, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones indicadas en el cuadro 4.24, descritas en el inciso 4.8. 	
		X			X		X	X	X	X						
					X		X	X	X	X	X					
		X					X	X	X	X	X					
ESTIMACIÓN DE ÁCIDOS RESINOSOS CLORADOS A PARTIR DE PRODUCCIÓN																
9	12-clorodihidroabiético	X	X				X	X	X	X					$E_{AR} = \left[\frac{\text{Emisión media en g/ADT}}{(1 - N_0)} \right] (1 - N_1) \times (\text{producción en AD/año})$ <p>E_{AR} = emisión de ácido resinoso clorado en gramos por año N_0 = 0.20 para 12 y 14 monocloro, y 0.10 para 12, 14 dicloro N_1 = eficiencia de remoción del sistema de tratamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> La emisión media corresponde a los intervalos del cuadro 4.25, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.26, descritas en el inciso 4.9. 	
		X	X				X	X	X	X						
		X	X				X	X	X	X	X					

Cálculo de emisiones de la producción de pulpa kraft y papel (continuación)													
Cuadro 4.4	Punto de emisión	Sustancia	Información requerida							Emisión media	Expresión general		
			Tipo de proceso	Tipo de materia prima	Consumo de agua	Blanqueo convencional	Blanqueo ECF o TCF	Pérdida de pulpa por blanqueo	Producción			Tratamiento del efluente	Generación de lodo de trat.
ESTIMACIÓN DE ÁCIDOS RESINOSOS CLORADOS A PARTIR DE CONSUMO DE AGUA													
		12-clorodihidroabiético	X	X	X	X	X	X	X	X	X	5.3	$E_{AR} = \left[\frac{\text{Emisión media en } \mu\text{g/l}}{(1-N_0)} \right] (1-N_1) (\text{consumo de agua en l/año})$ <p> E_{AR} = emisión de ácido resinoso clorado en microgramos por año N_0 = 0.20 para 12 y 14 monoclora, y 0.10 para 12, 14 dicloro. N_1 = eficiencia de remoción del sistema de tratamiento ♦ La emisión media corresponde a los intervalos del cuadro 4.25, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.26, descritas en el inciso 4.9. </p>
		14-clorodihidroabiético	X	X	X	X	X	X	X	X	X	5.2	
		12,14-diclorodihidroabiético	X	X	X	X	X	X	X	X	X	5.0	
9													
ESTIMACIÓN DE CLOROFORMO A PARTIR DE PRODUCCIÓN; BLANQUEO CONVENCIONAL													
		Cloroformo	X			X	X	X	X	X	X	0.5	$E_{CF} = (\text{Emisión media en kg/ADT}) (\text{producción de pulpa en AD/año})$ <p> E_{CF} = emisión de cloroformo en kilogramos por año ♦ La emisión media corresponde a los valores del cuadro 4.27, los cuales son válidos para las industrias que cumplen con las condiciones del cuadro 4.28, descritas en el inciso 4.10. </p>
			X				X	X	X	X	X	0.04	

Cálculo de emisiones de la producción de pulpa kraft y papel (continuación)														
Cuadro 4.4	Punto de emisión	Sustancia	Información requerida								Emisión media	Expresión general		
			Tipo de proceso	Tipo de materia prima	Consumo de agua	Blanqueo convencional	Blanqueo ECF o TCF	Pérdida de pulpa por blanqueo	Producción	Tratamiento del efluente			Generación de lodo de trat.	
ESTIMACIÓN DE METALES PESADOS														
		Arsénico	X		X				X				0.222	$E_{MP} = (\text{Emisión media en mg/l}) \times (\text{consumo de agua en l/año})$ <p>E_{MP} = emisión de metales pesados en miligramos por año ♦ La emisión media corresponde a los valores del cuadro 4.29, los cuales son válidos para las industrias mexicanas. ♦ Los metales pesados se discuten en el inciso 4.12.</p>
		Cadmio	X		X				X				0.007	
		Cianuros	X		X				X				0.002	
		Cobre	X		X				X				0.037	
		Cromo	X		X				X				0.208	
		Mercurio	X		X				X				5E-04	
		Níquel	X		X				X				0.052	
		Plomo	X		X				X				0.069	
		Zinc	X		X				X				0.161	
ESTIMACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS CLORADOS														
		Pentaclorofenol	X		X						X		2	$E_{PCP} = \left[\frac{\text{Emisión media en } \mu\text{g/l}}{(1 - 0.50)} \right] (1 - N_c) \times (\text{consumo de agua en l/año})$ <p>E_{PCP} = emisión de pentaclorofenol en microgramos por año ♦ Mayor detalle del valor propuesto, consultar inciso 4.12.</p>

Los ácidos resinosos que se desprenden de las fibras durante la fabricación de pulpa, son en su mayor parte ácido dihidroxiabiético y abiético (Liss, 1997). En el proceso kraft, el descortezado y la digestión representan los principales puntos de generación y emisión de estas sustancias al agua (Environment Agency, 2000). Se calcula que los ácidos resinosos pueden llegar a ser responsables de hasta 70% de la toxicidad presente en los efluentes de industrias productoras de pulpa (Thoms, 2000).

En el proceso kraft la recuperación de químicos es esencial ya que remueve la mayoría de los ácidos resinosos (Liss, 1997). El remanente se diluye con el agua residual del blanqueo y del lavado de pulpa, generando concentraciones de ácidos resinosos en efluentes sin tratamiento en el intervalo de 1 a 2 mg/l (Zender et al., 1994).

Cuadro 4.4	
CL₅₀ a 96h de ácidos resinosos, para salmón	
Acido resinoso	µg/l
Abiético	200 – 1500
Dihidroxiabiético	500 – 2100
Neoabiético	600 – 700
Pimánico	320 – 1200
Isopimánico	220 – 1000
Sandaracopimánico	360
Palústrico	500 – 600

FUENTE: Taylor et al., 1988.

Las fuentes de información consultadas, para la obtención de la ecuación de estimación, se indican en el cuadro 4.5. De éstas, el estudio realizado por Environment Canada (1997) se consideró como el más confiable, ya que incluye el análisis de un mayor número de industrias y muestras, y considera los factores que determinan la variabilidad de la emisión de ácidos resinosos, como el tipo de materia prima utilizada, el proceso productivo y el tratamiento del efluente.

Cuadro 4.5		
Fuentes de información para emisión de ácidos resinosos		
Fuente	Año	Estudio realizado
Brownlee et al.	1974	Descarga tratada de una industria kraft en la bahía Nipigon, Ontario.
Morales et al.	1992a	Descargas tratadas de industrias kraft del Norte de Alberta.
Environment Canada	1997	Descargas tratadas de industrias kraft de la Columbia Británica.

Este estudio formó parte del Fraser River Action Plan, que abarcó un extenso monitoreo de las emisiones contaminantes vertidas al Río Fraser, por fábricas productoras de pulpa y papel. Dichas industrias utilizan procesos kraft con las siguientes características:

- ♦ Madera de pino y abeto (*softwood*) como materia prima.
- ♦ Uso promedio de 110 m³ de agua por tonelada de pulpa producida.

- Sistema de blanqueo ECF, con sustitución del 100% a dióxido de cloro.
- Tratamiento secundario del efluente basado en lagunas de estabilización aerobias con tiempos de retención de 8 días.

Los valores de emisión propuestos, que se muestran en el cuadro 4.6, representan las emisiones de ácidos resinosos en efluentes tratados; por tanto, resultará importante definir la remoción típica de estas sustancias en sistemas de tratamiento convencionales, para poder ajustar dichos valores a distintas condiciones de operación.

Cuadro 4.6	Intervalos y valores promedio para la emisión de ácidos resinosos del proceso kraft				
	Ácido resinoso	g/ADt ³		µg/l	
		intervalo	media	intervalo	media
Abiético	0.512 – 60.152	9.49	5 – 587	92.7	
Dihidroxiabiético	0.512 – 35.661	9.31	5 – 348	90.9	
Neobiético	0.512 – 17.830	1.82	5 – 174	17.8	
Pimánico	0.512 – 25.413	2.06	5 – 248	20.1	
Isopimánico	0.512 – 42.014	10.39	5 – 410	101.4	
Sandaracopimánico	0.512 – 6.866	6.22	5 – 67	60.7	
Palústrico	0.512 – 28.078	4.32	5 – 274	42.2	

FUENTE: Adaptación libre de Environment Canada, 1997.

Remoción de ácidos resinosos. El tratamiento aerobio es el método más efectivo para remover ácidos resinosos (Liss, 1997). Bajo condiciones normales de operación, una laguna de estabilización aerobia puede degradar efectivamente los ácidos resinosos en un 90%, con un tiempo de retención de 4.5 días (Volk, 2000). Los sistemas de tratamiento anaerobios, por su parte, no han logrado buenos resultados debido a que estas sustancias provocan un efecto inhibitorio en la población de bacterias metanogénicas (Thoms, 2000).

Las eficiencias de remoción presentan fuertes variaciones, ocasionadas por las modificaciones en el proceso kraft, la composición de la madera utilizada y el diseño del sistema de tratamiento, donde el principal factor es el tiempo de retención hidráulico (Thoms, 2000). Las remociones observadas se muestran en el cuadro 4.7.

Cuadro 4.7	Eficiencias de remoción para ácidos grasos y resinosos		
	Referencia	Año	Remoción de ácidos grasos y resinosos %
Zender et al.	1994	80 – 100	Lagunas aireadas
Liss et al.	1997	80 – 100	Tratamiento aerobio
Schnell et al.	1997	80 – 94	Lagunas aireadas / lodos activados
Thoms	2000	80 – 94	Lodos activados convencional
Volk	2000	90	Lagunas aireadas

³ Del inglés: Air Dried metric tons

Tomando en cuenta las características de la información y la condición de la industria celulósico-papelera de México, se establecen las siguientes consideraciones (cuadro 4.8) para la aplicación de las expresiones de estimación mostradas en el cuadro 4.3 para ácidos resinosos.

Cuadro 4.8		Consideraciones para la estimación de ácidos resinosos	
	Característica	Fuente de información	Factor de aplicabilidad
Tipo de industria	Producción de pulpa kraft con madera de coníferas (softwood) y tratamiento secundario del efluente. Se conoce el uso de agua por tonelada de pulpa y la producción ha sido calculada en ADt.	Cuadro 4.6	0.8
Uso de agua	Si no se cuenta con el uso de agua se podrá considerar, asumiendo el intervalo típico para las industrias kraft de América del Norte, entre 60 y 150 m ³ /ADt de pulpa producida (un valor de 120 m ³ /ADt puede ser representativo).	NCASI, 1993	0.6
Eficiencia de remoción	Si no se cuenta con el nivel de tratamiento indicado, los valores del cuadro 4.6 deberán ajustarse a la eficiencia de remoción con que se cuente, mediante la siguiente expresión: $E_1 = \left[\frac{E_0}{(1-N_0)} \right] (1-N_1)$		
	E ₁ = emisión		0.6
	E ₀ = emisión media	Cuadro 4.6	0.8
	N ₀ = 0.80	Cuadro 4.7	0.6
	N ₁ = eficiencia de remoción de la industria		1.0
Cuantificación de la producción	La producción de pulpa debe ser cuantificada en ADt (10% de humedad), calculada antes de la primera etapa del blanqueo que utilice cloro o sus compuestos (USEPA, 2000b), tomando en cuenta la pérdida debida a dicho blanqueo.		1.0
	En un sistema de blanqueo convencional, la pérdida de pulpa puede considerarse entre 5 y 10% (un valor de 8% puede ser representativo).	USEPA, 2000b	0.6
	Para las industrias que utilicen el sistema TCF (Totally Chlorine Free), la cuantificación de la producción se realizará en ADt medida antes de la primer etapa del blanqueo donde se descargue agua residual (USEPA, 2000b).		1.0

4.4 Ácidos grasos

Los ácidos grasos se encuentran contenidos en la fracción de compuestos extractivos de la madera, junto con terpenos y fenoles (Johnston et al., 1996). Estos ácidos representan la fuente de almacenamiento de energía para los árboles, encontrándose en tejidos de semillas y resinas de madera blanda y dura (Alberta Environment, 1996). Su adición al efluente final, durante la fabricación de pulpa, se produce en las etapas de descortezado y digestión.

Algunos ácidos grasos pueden causar irritación al tracto respiratorio, ojos y piel; siendo investigados como tumorigenos y mutagénicos (USEPA, 2000d). Posiblemente el ácido palmítico sea el que presenta mayor toxicidad, la DL₅₀ obtenida en ratas para esta sustancia es de 10 g/kg de animal (CHHS, 1999).

Para la obtención del método de estimación se consideraron las fuentes de información mencionadas en el cuadro 4.5. Igual que para ácidos resinosos, se propone el uso de los valores obtenidos por Environment Canada (1997), mismos que se muestran en el cuadro 4.9.

Acido graso		Intervalos y valores promedio para la emisión de ácidos grasos del proceso kraft			
		g/ADt		µg/l	
		intervalo	media	intervalo	media
Oleico		0.584 - 1.640	0.80	5.7 - 16	7.8
Linoleico		0.605 - 1.127	0.83	5.9 - 11	8.1
Linolénico		1.947 - 5.944	3.56	19 - 58	34.7
Palmitico		2.254 - 5.534	3.69	22 - 54	36.0

FUENTE: Adaptación libre de Environment Canada, 1998.

Los ácidos grasos son biodegradables; cuando se emiten al agua cuentan con una vida media de entre 1 y 10 días, evaporándose en forma moderada (USEPA, 2000d). Las eficiencias de remoción de estos compuestos se consideran cercanas a las observadas para ácidos resinosos, por tanto, se asumirán las eficiencias expresadas en el cuadro 4.7.

Considerando la información disponible y las características de la industria mexicana, para la aplicación de la ecuación de emisión de ácidos grasos (cuadro 4.3), se establecen las siguientes consideraciones (cuadro 4.10).

Cuadro 4.10		Consideraciones para la estimación de ácidos grasos		
	Característica	Fuente de información	Factor de aplicabilidad	
Tipo de industria	Producción de pulpa kraft con madera de coníferas (softwood) y tratamiento secundario del efluente con eficiencia de remoción mayor a 80% para ácidos grasos. Se conoce el uso de agua por tonelada de pulpa y la producción ha sido calculada en ADt.	Cuadro 4.9	0.8	
Uso de agua	Si no se conoce el uso de agua se podrá considerar, asumiendo el intervalo típico para las industrias kraft de América del Norte, entre 60 y 150 m³/ADt de pulpa producida (un valor de 120 m³/ADt puede ser representativo).	NCASI, 1993	0.6	
Eficiencia de remoción	Si no se cuenta con el nivel de tratamiento indicado, los valores del cuadro 4.9 deberán ajustarse a la eficiencia de remoción con que se cuente, mediante la siguiente expresión: $E_1 = \left[\frac{E_0}{(1-N_0)} \right] (1-N_1)$			
	E_1 = emisión		0.6	
	E_0 = emisión media	Cuadro 4.9	0.8	
	N_0 = 0.80	Cuadro 4.7	0.6	
	N_1 = eficiencia de remoción de la industria		1.0	
Cuantificación de la producción	La producción de pulpa debe ser cuantificada en ADt (10% de humedad), calculada antes de la primer etapa del blanqueo que utilice cloro o sus compuestos (USEPA, 2000b), tomando en cuenta la pérdida debida a dicho blanqueo.		1.0	
	En un sistema de blanqueo convencional, la pérdida de pulpa puede considerarse entre 5 y 10% (un valor de 8% puede ser representativo).	USEPA, 2000b	0.6	
	Para las industrias que utilicen el sistema TCF, la cuantificación de la producción se realizará en ADt, medida antes de la primer etapa del blanqueo donde se descargue agua residual (USEPA, 2000b).		1.0	

4.5 Biocidas

Los biocidas son utilizados para controlar la formación de limo durante la producción de pulpa y papel, razón por la cual son clasificados como "limocidas" (DEPA, 2001). Los limocidas pueden adicionarse directamente al sistema de agua o estar incluidos en las formulaciones de las sustancias utilizadas para acondicionar la pasta.

Los materiales celulósicos ofrecen un medio favorable para el crecimiento microbiano. Cada tipo de pulpa cuenta con un ambiente específico, lo que ocasiona dificultades en el tratamiento bacterial (DEPA, 2001). Los microorganismos pueden ser dañinos al proceso no sólo por la formación de limo, sino porque pueden producir sulfito mediante reducción de compuestos de azufre o ácido sulfúrico por oxidación aerobia, generando corrosión en los equipos (GEPA, 2000).

Existe poca información concerniente a la cantidad de limocidas utilizados en esta industria. Valores reportados oscilan entre 20 y 200 g/t de papel producido, donde la fracción activa del producto es aproximadamente 25% (Eriksson et al., 1995). Otras fuentes señalan que el consumo de limocidas oscila entre 50 y 1000 g/ADt de pulpa producida (GEPA, 2000).

Se cuenta con una gran diversidad de productos disponibles; en general, entre los limocidas utilizados se cuentan: aldehídos, derivados fenólicos, compuestos orgánicos de azufre, aminas, compuestos cuaternarios de amonio y compuestos de plata (Sirkka, 2001).

En lo que concierne a la emisión de estos compuestos, la GEPA (German Environment Protection Agency) considera que el 80% de los limocidas adicionados al proceso saldrán contenidos en el producto (papel o pulpa seca), una porción extremadamente baja o nula se emitirá al aire (< 1%) y el resto, alrededor de 20%, terminará en el efluente final (GEPA, 2000).

En contraste, la Agencia de Protección Ambiental de Dinamarca supone, dado que los limocidas son solubles en agua, que la mayor parte de ellos continuará en ésta hasta el sistema de tratamiento y que la fracción que permanece en las fibras se desintegra durante el proceso productivo, considerándose como insignificante su presencia en el producto final (DEPA, 2001). Sin embargo, no existen estudios que sustenten esta teoría.

Remoción de limocidas. Para determinar la remoción de limocidas, en sistemas de tratamiento convencionales, se propone el uso del modelo PEC (Predicted Environmental Concentrations) propuesto por el Instituto Finlandés del Ambiente (Sirkka, 2001).

Para el uso de este modelo se requiere conocer los DT_{50}^4 considerando hidrólisis, fotólisis, biodegradación en agua y biodegradación en el sistema de tratamiento. Los primeros tres valores comúnmente son proporcionados por el fabricante y el último, determinado localmente. Sin embargo, si no se cuenta con el DT_{50} para el sistema de tratamiento biológico, se puede considerar que éste ocurre dos veces más rápido que en el agua (GEPA, 2000).

⁴ Tiempo requerido para degradar el 50% de la sustancia activa.

Conociendo los DT_{50} , el valor de las constantes de degradación (k) para hidrólisis, fotólisis y biodegradación, se pueden calcular con la siguiente expresión:

$$k = \frac{\ln 2}{DT_{50}} \quad (4.1)$$

Además de las constantes de degradación, se requiere conocer la concentración inicial de la sustancia activa; se propone la utilización del criterio de la Agencia de Protección Ambiental Alemana (GEPA, 2000), que considera una concentración inicial teórica (C_i) de:

$$C_i = \frac{0.20 (\text{Cantidad de sustancia activa empleada})}{\text{Volumen de agua residual}} \quad (4.2)$$

Con estos datos se procede a calcular las remociones en cada una de las etapas que componen el sistema de tratamiento. Las expresiones y variables involucradas se resumen en el cuadro 4.11.

Cuadro 4.11		Predicción de concentraciones en el ambiente para limocidas	
Vía de degradación	Expresión	Variables	
Concentraciones después de la degradación en el proceso productivo			
hidrólisis	$Ch = C_i * e^{(-k_{hdr})(t_r)}$	Ch = concentración después de la degradación por hidrólisis C_i = concentración inicial k_{hdr} = constante de degradación por hidrólisis t_r = tiempo de retención	
biológica	$Cb = C_i * e^{(-k_{biol})(t_r)}$	Cb = concentración después de la degradación biológica k_{biol} = constante de degradación biológica en agua	
Concentraciones después de la degradación en tratamiento primario			
hidrólisis	$Ch_{pre} = Ch * e^{(-k_{hdr})(t_{pr})}$	Ch_{pre} = concentración después de la degradación por hidrólisis en el tratamiento primario t_{pr} = tiempo de retención del tratamiento primario	
biológica	$Cb_{pre} = Cb * e^{(-k_{biol})(t_{pr})}$	Cb_{pre} = concentración después de la degradación biológica en el tratamiento primario	
Concentraciones después de la degradación en tratamiento secundario			
hidrólisis	$Ch_{ts} = Ch_{pre} * e^{(-k_{hdr})(t_{rs} + t_{rss})}$	Ch_{ts} = concentración después de la degradación por hidrólisis en tratamiento secundario t_{rs} = tiempo de retención del sistema de tratamiento secundario t_{rss} = tiempo de retención del sedimentador secundario	
biológica	$Cb_{ts} = Cb_{pre} * e^{(-k_{la})(t_{rs} * 0.5)}$	Cb_{ts} = concentración después de la degradación biológica en tratamiento secundario k_{la} = constante de degradación biológica para el sistema secundario t_{rs} = tiempo de retención del tratamiento secundario, asumiendo que el tiempo de retención promedio de la sustancia es la mitad del tiempo de retención hidráulico.	

FUENTE: Adaptación libre de GEPA, 2000.

Finalmente, la concentración que se emite al ambiente puede ser determinada mediante las ecuaciones 4.3 y 4.4, considerando dos situaciones:

Asumiendo que la fotólisis puede ser despreciable (sistemas de tratamiento con cortos períodos de retención) y que la biodegradación e hidrólisis son dos procesos independientes, la concentración final puede ser estimada como:

$$C_f = C_i - [(C_h - C_{h_{ts}}) + (C_b - C_{b_{ts}})] \quad (4.3)$$

Cuando la fotólisis no es despreciable (lagunas de estabilización), considerando que ésta incluye hidrólisis y que ocurre durante el día (la mitad del tiempo), la degradación por esta vía se determina como:

$$C_p = C_h * e^{(-k_{fot})\left(\frac{t_{pr} + t_{rss}}{2}\right)} \quad (4.4)$$

donde la concentración final estará dada por:

$$C_f = C_i - [(C_h - C_p) + (C_b - C_{b_{ts}})] \quad (4.5)$$

Considerando la información requerida, se presentan las siguientes consideraciones (cuadro 4.12) para la aplicación de la ecuación de emisión mostrada en el cuadro 4.3.

Cuadro 4.12		Consideraciones para la estimación de limocidas	
	Característica	Fuente de información	Factor de aplicabilidad
Consumo de la sustancia activa	El consumo de limocidas deberá considerar: la cantidad adicionada directamente al agua para el control microbioal y la contenida en las sustancias utilizadas para acondicionar la pasta para papel. Una vez determinado este dato, se asumirá que el 20% es emitido con el efluente final.	GEPA, 2000	0.6
Remoción de limocidas	La eficiencia de remoción podrá ser estimada utilizando el modelo PEC; para ello se deberá conocer los tiempos de degradación de la sustancia activa manejada.	Sirkka, 2001	0.8
Cuantificación de la producción	Si se utiliza la producción para determinar la cantidad utilizada de limocidas, ésta deberá ser cuantificada en ADt (10% de humedad) calculada antes de la primer etapa del blanqueo que utilice cloro o sus compuestos (USEPA, 2000b), tomando en cuenta la pérdida debida a éste.		1.0
	En un sistema de blanqueo convencional, la pérdida de pulpa puede considerarse entre 5 y 10% (un valor de 8% puede ser representativo).	USEPA, 2000b	0.6
	Para las industrias que utilicen el sistema TCF, la cuantificación de la producción se realizará en ADt, medida antes de la primer etapa del blanqueo donde se descargue agua residual (USEPA, 2000b).		1.0

4.6 Dioxinas y furanos

Las dibenzodioxinas policloradas (PCDD) y los dibenzofuranos policlorados (PCDF) son sustancias químicamente relacionadas. Las dioxinas y furanos son compuestos tricíclicos, con dos átomos de oxígeno en el caso de las dioxinas y uno en el caso de los furanos, que se forman durante el tratamiento térmico de compuestos fenólicos o aromáticos en presencia de cloro (USEPA, 1998).

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Sus fuentes antropogénicas comprenden una amplia gama de procesos, en general, se consideran las más importantes:

- *Procesos de combustión.* De residuos médicos, municipales y peligrosos; madera; horno de cemento; carburantes (particularmente diesel); fundiciones de acero y metalurgia.
- *Procesos líquidos.* Blanqueo de pulpa con cloro o sus compuestos, fabricación de productos organoclorados y manufactura de cloro.
- *Fabricación de productos químicos.* Uso y dispersión de productos comerciales como plaguicidas (2,4-D, por ejemplo) y solventes clorados (como pentaclorofenol que es utilizado para preservar la madera).

En función de todas las posibles combinaciones entre átomos de cloro e hidrógeno se pueden encontrar un total de 75 isómeros de PCDD y 135 isómeros de PCDF (CCA, 1998). Entre las dioxinas más tóxicas se encuentra la 2,3,7,8-tetracloro dibenzo-p-dioxina, que es considerada responsable de la mayor parte de los efectos producidos por las mezclas de PCDDs (USEPA, 1998), siendo capaz de producir daños a nivel dermatológico, hepático, cardiovascular, respiratorio, endocrino, inmunológico, neurológico y hasta psiquiátrico (CCA, 1998). Se ha comprobado que es fetotóxica y teratogénica en animales, clasificándose como una sustancia carcinogénica para humanos (USEPA, 2000d). Su capacidad tóxica, es decir, la dosis capaz de producir daño en un sistema biológico, es alrededor de cien mil veces mayor que la del cianuro (NIEHS, 2001).

A partir de 1987 la USEPA ha conducido estudios en industrias productoras de celulosa, con el fin de caracterizar sus efluentes. En 1988 se emitieron los primeros resultados, corroborándose que el proceso de blanqueo era el principal responsable de la emisión de PCDDs y PCDFs al agua (USEPA, 1998).

Como se indicó en el cuadro 3.9, hasta 1995 la mayor parte de las industrias estadounidenses utilizaban cloro elemental en el proceso de blanqueo (USEPA, 1995). Sin embargo, a raíz de los primeros resultados obtenidos por USEPA (1988) se efectuaron modificaciones a dicho proceso. Los cambios se orientaron a la implementación del sistema ECF, que se basa en la sustitución de cloro elemental con dióxido de cloro, y del proceso TCF que opera sin la utilización de cloro o sus compuestos. Estos sistemas han significado una disminución mayor al 90% en la generación de contaminantes, respecto del proceso convencional (Environment Canada, 1998).

Tomando en cuenta las reducciones registradas en los últimos años, USEPA ha podido determinar a partir de 1988, con altos niveles de confianza, intervalos para la estimación de dioxinas y furanos en los efluentes, todos del tratamiento de agua residual y pulpas blanqueadas. No obstante, USEPA considera que las mejores mediciones de dioxinas y furanos fueron realizadas durante 1987 y 1994 (USEPA, 1998), por lo que se proponen los intervalos mostrados en el cuadro 4.13 para la estimación de emisiones.

Para determinar la remoción de estos compuestos, en sistemas de tratamiento convencionales, se utilizará el criterio emitido por USEPA (2000b) que señala una remoción de dioxinas y furanos "universal" de 78%, para sistemas de tratamiento biológicos.

Cuadro 4.13		Intervalos y valores promedio para la emisión de dioxinas y furanos proceso kraft					
Año	Sustancia	Pulpa blanqueada		Lodo de tratamiento		Efluente	
		media µg/ADt	intervalo µg/ADt	media µg/t	intervalo µg/t	media pg/l	intervalo pg/l
1987	2,3,7,8-TCDD	6.4	0.4 – 124	63	ND (6.3) – 180	42	ND (11) – 98
	2,3,7,8-TCDF	18	1.4 – 716	233	13 – 1 150	120	12 – 840
1994	2,3,7,8-TCDD	ND(1)	ND(1) – 5	ND(1)	ND(1) – 4	ND(11)	ND(10) – 21
	2,3,7,8-TCDF	ND(1)	ND(1) – 170	3	ND(1) – 31	ND(11)	ND(10) – 23

pg/l = picogramos / litro de agua residual tratada

ND = valores no detectados, límites de detección en paréntesis (LD). Para los valores en los que no se detectan concentraciones, USEPA considera dicho valor como la mitad del valor límite de detección del equipo (Powell, 1997).

FUENTE: USEPA, 1998.

Considerando esta información, para la aplicación de las ecuaciones de dioxinas y furanos del cuadro 4.3, se establecen las consideraciones del cuadro 4.14, para su estimación.

Cuadro 4.14		Consideraciones para la estimación de dioxinas y furanos		
	Característica	Fuente de Información	Factor de aplicabilidad	
Tipo de industria	Producción de pulpa kraft, sistema de blanqueo con el uso de cloro y sus compuestos. Sistema de tratamiento secundario con remoción cercana al 80%. Se conoce el uso de agua por tonelada de pulpa y la producción ha sido calculada en ADt.	Cuadro 4.13 año 1987	0.9	
	Producción de pulpa kraft, sistema de blanqueo ECF o TCF. Sistema de tratamiento secundario con remoción cercana al 80%. Se conoce el uso de agua por tonelada de pulpa producida y la producción ha sido calculada en ADt.	Cuadro 4.13 año 1994	0.9	
Uso de agua	Si no se conoce el uso de agua se podrá considerar, asumiendo el intervalo típico para las industrias kraft de América del Norte, entre 60 y 150 m³/ADt de pulpa producida (un valor de 120 m³/ADt puede ser representativo).	NCASI, 1993	0.6	
Eficiencia de remoción	Si no se cuenta con el nivel de tratamiento indicado, los valores del cuadro 4.13 deberán ajustarse a la eficiencia de remoción con que se cuente, mediante la siguiente expresión: $E_1 = \left[\frac{E_0}{(1-N_0)} \right] (1-N_1)$			
	E ₁ = emisión		0.6	
	E ₀ = emisión media	Cuadro 4.13	0.9	
	N ₀ = 0.78	USEPA, 2000	0.6	
	N ₁ = eficiencia de remoción de la industria		1.0	
Cuantificación de la producción	La producción de pulpa debe ser cuantificada en ADt (10% de humedad) calculada antes de la primer etapa del blanqueo que utilice cloro o sus compuestos (USEPA, 2000b), considerando la pérdida debida al blanqueo.		1.0	
	En un sistema de blanqueo convencional, la pérdida de pulpa puede considerarse entre 5 y 10% (un valor de 8% puede ser representativo).	USEPA, 2000b	0.6	
	Para las industrias que utilicen el sistema TCF, la cuantificación de la producción se realizará en ADt, medida antes de la primer etapa del blanqueo donde se descargue agua residual (USEPA, 2000b).		1.0	
Generación de lodo de tratamiento	La generación de lodo de tratamiento se puede considerar, de no contar con dicha información, en un intervalo de 14 a 140 kg de lodo por tonelada de pulpa producida.	USEPA, 1998	0.5	

4.7 Compuestos fenólicos clorados

Los compuestos fenólicos clorados son altamente tóxicos, presentan un amplio espectro de efectos, incluidas acciones teratogénicas y cancerígenas (USEPA, 2000d). Además, son relativamente persistentes en el medio y se sabe que son precursores de dioxinas y furanos (Allsopp et al., 1994); no obstante, se consideran de mucho menor grado de toxicidad que éstos. Por ejemplo, USEPA estima que el potencial cancerígeno del 2,4,6-triclorofenol puede ser siete ordenes de magnitud mas bajo que el de 2,3,7,8-TCDD (Powell, 1997).

La toxicidad de los efluentes kraft comúnmente se determina en unidades de TEQ (Toxic Equivalency), ya que se considera que la toxicidad de las mezclas puede incrementarse al interactuar las propiedades toxicas de cada compuesto. La TEQ se obtiene multiplicando la concentración de los compuestos presentes por su factor de toxicidad equivalente TEF (Toxicity Equivalence Factor). Los TEF son referidos al compuesto de mayor capacidad toxica presente en la mezcla, en este caso pentaclorofenol. El cuadro 4.15 muestra el TEF para compuestos fenólicos clorados, mientras que el cuadro 4.16 contempla las CL₅₀ a 96h de estas sustancias, obtenidas para trucha arco iris.

Cuadro 4.15		TEF para compuestos fenólicos clorados	
Compuesto		TEF	
Pentaclorofenol		1	
Tetraclorofenoles		0.5	
Triclorofenoles		0.2	
Diclorofenoles		0.1	
Monoclorofenoles		0.04	

FUENTE: Adaptación libre de Bright, 1998.

Cuadro 4.16		CL₅₀ a 96h de compuestos fenólicos clorados, para trucha arco iris	
Sustancia	µg/l	Sustancia	µg/l
6-clorovanillin	2,600	4,5,6-tricloroguayacol	800
3,4,5-triclorosyringol	800*	2,4,5-triclorofenol	760
4,5-diclorocatecol	100	2,4,6-triclorofenol	730
3,4,5-triclorocatecol	1000	Tetraclorocatecol	400
3,4,6-triclorocatecol	900	Tetracloroguayacol	300
4,5-dicloroguayacol	2200	2,3,4,6-tetraclorofenol	250
3,4,5-tricloroguayacol	750	Pentaclorofenol	97
3,4,6-tricloroguayacol	760		

*Concentración determinada en larvas de zefrafish

FUENTE: Adaptación libre de Bright, 1998.

Son varios los estudios realizados para caracterizar estas sustancias, pudiéndose citar: Bahía Nipigon en la provincia de Ontario (Brownlee et al., 1974), en el que se logró identificar 6 compuestos fenólicos clorados; Lindström y Nordin (1976), determinan 13 compuestos; Suntio y su grupo (1988), estiman alrededor de 180; Morales y otros (1992b), identifican 33, y finalmente, el

realizado por Environment Canada como parte del Fraser River Action Plan (1994–1996), en el que se observó el comportamiento de 44 compuestos de este tipo (Environment Canada, 1998 y 2000).

Tomando en cuenta la confiabilidad de la información, se ha elegido incluir los intervalos obtenidos por Environment Canada. Las características de las industrias analizadas se mencionaron en el inciso 4.3; sin embargo, cabe señalar que éstas sustituyeron a lo largo del estudio sus sistemas convencionales de blanqueo por sistemas ECF, registrando reducciones en sus emisiones reportadas en más del 95% (Environment Canada, 1998). Por tal motivo, se presentan a continuación los conjuntos de valores (cuadros 4.17 y 4.18) obtenidos para cada sistema de blanqueo. Para las condiciones de México se utilizarán los datos propuestos para sistema convencional de blanqueo, dadas las características de la industria mexicana.

Sustancia	Intervalos y valores promedio para compuestos fenólicos clorados proceso kraft con blanqueo convencional			
	g/ADt		ng/l	
	intervalo	media	intervalo	media
3,4,5-tricloroguayacol	1.9163 – 8.3311	4.2014	18,700 – 81,300	41,000
3,4,6-tricloroguayacol	0.2357 – 1.3219	0.8300	2,300 – 12,900	8,100
4,5,6-tricloroguayacol	0.3792 – 1.5269	0.8710	3,700 – 14,900	8,500
2,4,6-triclorofenol	0.2562 – 1.5269	0.6968	2,500 – 10,500	6,800
Tetraclorocatecol	0.1947 – 6.2714	2.5413	1,900 – 61,200	24,800
Tetracloroguayacol	0.8915 – 9.4993	4.5396	8,700 – 92,700	44,300
2,3,4,6-tetraclorofenol	0.0307 – 0.3996	0.2562	300 – 3,900	2,500
Pentaclorofenol	0.0615 – 0.1845	0.1127	600 – 1,800	1,100

ng/l = nanogramos / litro de agua residual tratada

FUENTE: Adaptación libre de Environment Canada, 1998 y 2000.

Sustancia	Intervalos y valores promedio para compuestos fenólicos clorados proceso kraft con blanqueo ECF			
	mg/ADt		ng/l	
	intervalo	media	intervalo	media
6-clorovanillin	174.205 – 1024.735	355.5830	1,700 – 10,000	3,470.0
3,4,5-triclorosiringol	0.092 – 1.640	0.4898	0.9 – 16	4.7
4,5-diclorocatecol	1.127 – 31.767	1.8450	11 – 310	18.0
3,4,5-triclorocatecol	0.082 – 1.840	0.7481	0.8 – 18	7.3
3,4,6-triclorocatecol	0.092 – 1.740	0.6148	0.9 – 17	6.0
4,5-dicloroguayacol	1.947 – 8.608	3.6280	19 – 84	35.4
3,4,5-tricloroguayacol	0.082 – 1.330	0.5841	0.8 – 13	5.7
3,4,6-tricloroguayacol	0.010 – 0.615	0.2767	0.1 – 6.0	2.7
4,5,6-tricloroguayacol	0.215 – 2.050	0.6353	2.1 – 20	6.2
2,4,5-triclorofenol	0.030 – 1.640	0.6148	0.3 – 16	6.0
2,4,6-triclorofenol	0.502 – 17.400	2.6848	4.9 – 170	26.2
Tetraclorocatecol	0.225 – 3.280	1.4244	2.2 – 32	13.9
Tetracloroguayacol	0.071 – 1.430	0.5021	0.7 – 14	4.9
2,3,4,6-tetraclorofenol	0.174 – 1.130	0.5021	1.7 – 11	4.9
Pentaclorofenol	0.410 – 1.430	0.7173	4 – 14	7.0

FUENTE: Adaptación libre de Environment Canada, 1998.

Remoción de compuestos fenólicos clorados. Solomon y colaboradores (1993), compendieron la tratabilidad de estas sustancias, encontrando eficiencias de remoción en el intervalo de 50 a 90% cuando se cuenta con tratamiento secundario. Greaves y su grupo (1995), determinan que, para tratamiento aeróbico de fenoles clorados de bajo peso⁵, las eficiencias de remoción se encuentran entre 29 y 100%; mientras que Yin y colaboradores (1994), demostraron que el tratamiento secundario basado en lagunas de estabilización, con tiempos de retención de 6 días, podía reducir el 80% de los compuestos fenólicos. Finalmente, la Agencia Ambiental Británica (Environment Agency, 2000), señala que el tratamiento biológico puede remover los compuestos fenólicos clorados de 70 a 90%, incluyendo pentaclorofenol. En el cuadro 4.19 se integran las remociones observadas para este tipo de compuestos.

Cuadro 4.19		Porcentajes de remoción para compuestos fenólicos clorados	
Referencia	Año	Remoción compuestos fenólicos clorados %	Tipo de tratamiento
Puhakka et al.	1992	90 - 95	Lodos activados fases aerobia y anóxica
Solomon et al.	1993	50 - 90	Lagunas aireadas
Yin et al.	1994	>90	Lagunas aireadas
Graves et al.	1995	29 - 100	Lodos activados
Environment Agency	2000	70 - 90	Lodos activados

Como se observa, la remoción de estos compuestos presenta grandes variaciones, debidas a la complejidad de las sustancias contenidas en esta clasificación. No obstante, el grupo de Solomon señala que una remoción mínima de 50% puede ser representativa (dato que se asumirá para la ecuación de estimación).

Tomando en cuenta las características de la información y la condición de la industria celulósico-papelera de México, se aplicará la ecuación de emisión del cuadro 4.3 bajo las siguientes consideraciones (cuadro 4.20).

Cuadro 4.20		Consideraciones para la estimación de compuestos fenólicos clorados	
	Característica	Fuente de información	Factor de aplicabilidad
Tipo de industria	Producción de pulpa kraft con sistema de blanqueo convencional. Se cuenta con tratamiento secundario para el efluente, se asume una remoción cercana a 50% de compuestos fenólicos clorados. Se conoce el uso de agua por tonelada de pulpa y la producción ha sido calculada en ADt.	Cuadro 4.17	0.8
	Producción de pulpa kraft con sistema de blanqueo ECF. Se cuenta con tratamiento secundario para el efluente, se asume una remoción cercana a 50% de compuestos fenólicos clorados. Se conoce el uso de agua por tonelada de pulpa y la producción ha sido calculada en ADt.	Cuadro 4.18	0.8

⁵ Catecoles, guayacoles, vanillinas y siringoles con menos de 3 cloros.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Cuadro 4.20		Consideraciones para la estimación de compuestos fenólicos clorados (continuación)	
	Característica	Fuente de información	Factor de aplicabilidad
Uso de agua	Si no se cuenta con el uso de agua este dato se podrá considerar, asumiendo el intervalo típico para las industrias kraft de América del Norte, entre 60 y 150 m ³ /ADt de pulpa producida (un valor de 120 m ³ /ADt puede ser representativo).	NCASI, 1993	0.6
Eficiencia de remoción	Si no se cuenta con el nivel de tratamiento indicado, los valores de los cuadros 4.17 y 4.18 deberán ajustarse a la eficiencia de remoción con que se cuente mediante la siguiente expresión: $E_1 = \left[\frac{E_0}{(1 - N_0)} \right] (1 - N_1)$		
	E ₁ = emisión		0.6
	E ₀ = emisión media	Cuadro 4.17 o 4.18	0.8
	N ₀ = 0.50	Cuadro 4.19	0.6
	N ₁ = eficiencia de remoción de la industria		1.0
Cuantificación de la producción	La producción de pulpa debe ser cuantificada en ADt (10% de humedad), calculada antes de la primer etapa del blanqueo que utilice cloro o sus compuestos (USEPA, 2000b), considerando la pérdida debida al blanqueo.		1.0
	En un sistema de blanqueo convencional, la pérdida de pulpa puede considerarse entre 5 y 10% (un valor de 8% puede ser representativo).	USEPA, 2000b	0.6
	Para las industrias que utilicen el sistema TCF, la cuantificación de la producción se realizará en ADt medida antes de la primer etapa del blanqueo donde se descargue agua residual (USEPA, 2000b).		1.0

4.8 Halógenos orgánicos adsorbibles (AOX)

Dada la complejidad y diversidad de las sustancias presentes en los efluentes de esta industria, se ha vuelto común el uso de varios parámetros para su caracterización. En adición a la DQO y DBO₅, comúnmente utilizadas, se ha empleado el parámetro AOX (Adsorbable Organic Halides) para estimar la presencia de compuestos organoclorados en el agua (Johnston et al., 1996).

Este indicador se utilizó por primera vez en Suecia en 1977. El término adsorbible se refiere a la técnica de medición empleada, en la que los compuestos son adsorbidos sobre carbón activado antes de su cuantificación por una técnica de combustión (Johnston et al., 1996). El indicador AOX se ha incluido en las normatividades de varios países por sus ventajas de costo y confiabilidad (Powell, 1997), y porque su cuantificación incluye aquellos compuestos organoclorados que no han sido identificados o estudiados a detalle, pero que pudiesen representar un riesgo ambiental (FEA, 1997). Para la estimación del indicador existen varias propuestas: el grupo de Johnston propone, para las industrias que utilizan cloro y dióxido de cloro, una cuantificación aproximada mediante la siguiente expresión:

$$AOX = 0.1 \left(\text{carga de Cl}_2 + \frac{\text{carga de ClO}_2}{5} \right) \quad (4.6)$$

Otros investigadores y algunas agencias ambientales, como las de Estados Unidos y Gran Bretaña, han propuesto intervalos para la estimación del indicador AOX, los cuales se muestran en los cuadros 4.21 y 4.22.

Cuadro 4.21		Intervalos y valores promedio para emisión de AOX, proceso kraft	
Referencia	Año	Generación de AOX (kg/ADt de pulpa)	Tipo de blanqueo
Gullichsen	1991	2.5 – 7 *	Basado en cloro
Lehtinen et al.	1991	0.5	ECF
Solomon et al.	1993	0.7	ECF
Johnston et al.	1996	5 – 10	Basado en cloro
		1.5	ECF
Sanjuán	1997	8 – 10*	Basado en cloro
		1.5 – 2.5*	ECF
		4 – 5*	50% ECF
Powell	1997	0.5	ECF
		0.25 *	TCF
RUF	1999	10	Basado en cloro
		1.5	ECF
Environment Agency	2000	8 – 9	Basado en cloro
		<1	ECF
		1.5 – 2	50% ECF
		0.005	TCF

* Valores recomendados para la estimación.

Cuadro 4.22		Emisión media de AOX y su remoción mediante lodos activados			
Variante de proceso y sistema de blanqueo	Antes de lodos activados		Después de lodos activados		
	Número kappa	AOX kg/ADt	Número kappa	AOX kg/ADt	
Kraft estándar (CEDED)	30	7.0	-	3.9	
Cocción extendida (CpEDED)	24	4.8	-	2.2	
Con oxígeno (CE ₀ DED)	18	3.5	-	1.9	
Extendida + O ₂ (CpE ₀ DED)	14	2.8	-	1.3	

FUENTE: Gullichsen, 1991.

La eficiencia de remoción para compuestos organoclorados, medidos como AOX, ha sido determinada en varios sistemas de tratamiento. En adición a las remociones presentadas en el cuadro 4.22, observadas en sistemas basados en lodos activados, se muestran las estimadas para otros sistemas de tratamiento (cuadro 4.23).

Cuadro 4.23		Porcentajes de remoción para AOX en sistemas de tratamiento biológicos	
Referencia	Año	Remoción de AOX %	Tipo de tratamiento
Solomon et al.	1993	65	Lagunas aireadas blanqueo ECF
Tripathi et al.	2000	40 – 50	Termofílico blanqueo basado en cloro
Environment Agency	2000	40	Lodos activados

Tomando en cuenta la información presentada, se proponen las consideraciones del cuadro 4.24 para el uso de la ecuación de emisión del indicador AOX, incluida en el cuadro 4.3.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Cuadro 4.24		Consideraciones para la estimación del indicador AOX	
	Característica	Fuente de información	Factor de aplicabilidad
Tipo de industria	Producción de pulpa kraft, sistema de blanqueo con el uso de cloro y sus compuestos. Tratamiento secundario basado en lodos activados. Se conoce el uso de agua por tonelada de pulpa y la producción ha sido calculada en ADt.	Cuadro 4.22	0.6
	Producción de pulpa kraft, sistema de blanqueo ECF. Tratamiento secundario del efluente. Se conoce el uso de agua por tonelada de pulpa y la producción ha sido calculada en ADt.	Cuadro 4.21	0.6
	Producción de pulpa kraft, sistema de blanqueo TCF. Tratamiento secundario del efluente. Se conoce el uso de agua por tonelada de pulpa y la producción ha sido calculada en ADt.	Cuadro 4.21	0.6
Eficiencia de remoción	Si no se cuenta con el nivel de tratamiento indicado, los valores elegidos deberán ajustarse a la eficiencia de remoción con que se cuente, mediante la siguiente expresión: $E_1 = \left[\frac{E_0}{(1-N_0)} \right] (1-N_1)$		
	E_1 = emisión		0.6
	E_0 = emisión media	Cuadro 4.21 o 4.22	0.6
	N_0 = 0.50, asumiendo la misma remoción que para organoclorados	Cuadro 4.23	0.6
	N_1 = eficiencia de remoción de la industria		1.0
Cuantificación de la producción	La producción de pulpa debe ser cuantificada en ADt (10% de humedad), calculada antes de la primer etapa del blanqueo que utilice cloro o sus compuestos (USEPA, 2000b), tomando en cuenta la pérdida debida al blanqueo.		1.0
	En un sistema de blanqueo convencional, la pérdida de pulpa puede considerarse entre 5 y 10% (un valor de 8% puede ser representativo).	USEPA, 2000b	0.6
	Para las industrias que utilicen el sistema TCF, la cuantificación de la producción se realizará en ADt, medida antes de la primer etapa del blanqueo donde se descargue agua residual (USEPA, 2000b).		1.0

4.9 Ácidos resinosos clorados

Los ácidos resinosos que no fueron removidos de las fibras con los condensados de la digestión o mediante el sistema de lavado, ingresan a la etapa de blanqueo formando ácidos resinosos clorados (Bryce, 1991). Los esfuerzos en la determinación de estas sustancias se han enfocado, por su magnitud y grado de toxicidad, a los ácidos abiéticos derivados (Bryce, 1991; Zender et al., 1994 y Environment Canada, 1997). Para la estimación de estas sustancias, se ha elegido nuevamente los intervalos obtenidos por Environment Canada (1997), mismos que se muestran en el cuadro 4.25.

Cuadro 4.25		Intervalos y valores promedio para ácidos resinosos clorados			
Acido resinosos clorado	g/ADt		µg/l		
	intervalo	media	intervalo	media	
12-clorodihidroabiético	0.512 - 1.435	0.543	5 - 14	5.3	
14-clorodihidroabiético	0.512 - 1.435	0.533	5 - 14	5.2	
12,14-diclorodehidroabiético	- -	0.512	- -	5.0	

FUENTE: Adaptación libre de Environment Canada, 1997.

Los ácidos resinosos clorados son resistentes a la biodegradación (Liss, 1997). Se ha demostrado que el porcentaje de degradación para ácidos mono y dicloro-dedihidroabiéticos es alrededor de 4 y 10 veces menor, respectivamente, que el de los ácidos resinosos no clorados (Zender et al., 1994).

Por ejemplo, la degradación completa del ácido dihidroxiabiético requiere de 48 horas, en tanto que los ácidos mono y dicloro dedihidroabiético, luego de un tiempo de retención de 14 días, únicamente logran remociones del 90 y 40% respectivamente (Liss, 1997). Para la ecuación de estimación se considerará la remoción propuesta por Zender y su grupo (1994), para sistemas de tratamiento secundarios, de 20% para los ácidos monoclorados y 10% para los diclorados.

En el cuadro 4.26 se presenta el resumen de las consideraciones para la estimación de ácidos resinosos clorados.

Cuadro 4.26		Consideraciones para la estimación de ácidos resinosos clorados	
	Característica	Fuente de información	Factor de aplicabilidad
Tipo de industria	Producción de pulpa kraft con madera de coníferas (softwood), sistema de blanqueo ECF y tratamiento secundario del efluente, asumiendo una remoción máxima de 20% para estas sustancias. Se conoce el uso de agua por tonelada de pulpa y la producción ha sido calculada en ADt.	Cuadro 4.25	0.8
Uso de agua	Si no se cuenta con el uso de agua se podrá considerar, asumiendo el intervalo típico para las industrias kraft de América del Norte, entre 60 y 150 m ³ /ADt de pulpa producida (un valor de 120 m ³ /ADt puede ser representativo).	NCASI, 1993	0.6
Eficiencia de remoción	Si no se cuenta con el nivel de tratamiento indicado, los valores del cuadro 4.25 deberán ajustarse a la eficiencia de remoción con que se cuente, mediante la siguiente expresión: $E_1 = \left[\frac{E_0}{(1 - N_0)} \right] (1 - N_1)$		
	E_1 = emisión		0.6
	E_0 = emisión media	Cuadro 4.25	0.8
	N_0 = 0.20 para 12 y 14 monocloro, y 0.10 para 12,14 dicloro.	Zender et al., 1994	0.6
	N_1 = eficiencia de remoción de la industria		1.0
Cuantificación de la producción	La producción de pulpa debe ser cuantificada en ADt (10% de humedad), calculada antes de la primer etapa del blanqueo que utilice cloro o sus compuestos (USEPA, 2000b), tomando en cuenta la pérdida debida al blanqueo.		1.0
	En un sistema de blanqueo convencional, la pérdida de pulpa puede considerarse entre 5 y 10% (un valor de 8% puede ser representativo).	USEPA, 2000b	0.6
	Para las industrias que utilicen el sistema TCF, la cuantificación de la producción se realizará en ADt, medida antes de la primer etapa del blanqueo donde se descargue agua residual (USEPA, 2000b).		1.0

4.10 Compuestos orgánicos volátiles

Alrededor del 35% de los organoclorados emitidos al agua durante la producción de pulpa kraft, están conformados por compuestos de bajo peso molecular. Cuantitativamente el más importante es el cloroformo, que puede producirse en cantidades superiores a 40 g/ADt de pulpa (Johnston et al., 1996).

El cloroformo se genera como subproducto de muchos procesos relacionados con la química del cloro, incluyendo el blanqueo de pulpa para papel (USEPA, 2000d). La mayor parte de éste se concibe durante la etapa de hipoclorito (80 a 90%); el resto se forma en las fases de cloración y extracción y una mínima parte con la utilización de dióxido de cloro (CEPA, 2000).

La generación de cloroformo se relaciona con el contenido de lignina en la fibra y la cantidad de compuestos de cloro aplicados; siendo este último, el factor determinante para que los sistemas ECF registren reducciones en la generación de cloroformo en alrededor del 98%, respecto del proceso original (CEPA, 2000).

El cloroformo puede afectar al sistema nervioso central, riñones e hígado (Greenpeace, 2000); se ha demostrado que existe una relación entre la contaminación del agua con cloroformo y el aumento de cáncer de colon y vejiga (IARC, 1979). Con base en ello, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) determinó que el cloroformo es un cancerígeno humano posible, en tanto que USEPA lo considera como un cancerígeno humano probable (USEPA, 2000c). El efecto en los organismos acuáticos también es importante; por ejemplo, la CL₅₀ a 96 h para trucha arco iris se encuentra entre 1.24 mg/l a 200 CaCO₃ y 2.03 mg/l a 50 CaCO₃ (Birge et al., 1979).

Igual que en secciones anteriores, se integran enseguida los valores de emisión para cloroformo, observados en industrias que cuentan con procesos kraft y sistemas de blanqueo convencionales y ECF (cuadro 4.27).

Cuadro 4.27		Emisión media de cloroformo, proceso kraft	
Referencia	Año	Emisión media de cloroformo (kg/ADt de pulpa)	Tipo de blanqueo
Kroesa	1992	0.3	Basado en cloro
Solomon et al.	1993	0.5	Basado en cloro
		0.04	ECF
Wiesemann	1994	0.04	ECF
Johnston et al.	1996	0.04	ECF

Remoción de cloroformo. Prevalece una discusión acerca de la biodegradación del cloroformo en sistemas acuáticos. La mayoría de los estudios señala que, bajo condiciones aerobias, existe una pequeña degradación después de más de 25 semanas. Por otra parte, en presencia de bacterias metanogénicas o nitrificantes, el cloroformo puede ser co-metabolizado y mineralizado a dióxido de carbono y cloruros; sin embargo, la relevancia de esta degradación también es limitada (USEPA, 1984).

Esta situación se debe a la sensibilidad de los microorganismos al cloroformo; Jackson y Brown (1970), reportaron que una concentración de 0.1 mg/l puede retardar la digestión anaerobia en los sistemas de tratamiento. Por su parte, Yang y Speece (1986), observaron inhibición de poblaciones no aclimatadas a concentraciones de 0.5 mg/l y con aclimatación a 15 mg/l. Por lo tanto, para la ecuación de emisión de cloroformo se considerará despreciable su degradación en los sistemas de

tratamiento de agua residual. Las consideraciones para la estimación de cloroformo basadas en la información antes presentada, se muestran en el cuadro 4.28.

Cuadro 4.28		Consideraciones para la estimación de cloroformo	
	Característica	Fuente de información	Factor de aplicabilidad
Tipo de industria	Producción de pulpa kraft, sistema de blanqueo basado en cloro. La producción ha sido calculada en ADt y se considera que la remoción de cloroformo en los sistemas de tratamiento es despreciable.	Cuadro 4.27	0.6
	Producción de pulpa kraft, sistema de blanqueo ECF. La producción ha sido calculada en ADt y se considera que la remoción de cloroformo en los sistemas de tratamiento es despreciable.	Cuadro 4.27	0.6
Cuantificación de la producción	La producción de pulpa debe ser cuantificada en ADt (10% de humedad), calculada antes de la primer etapa del blanqueo que utilice cloro o sus compuestos (USEPA, 2000b), tomando en cuenta la pérdida debida al blanqueo.		1.0
	En un sistema de blanqueo convencional, la pérdida de pulpa puede considerarse entre 5 y 10% (un valor de 8% puede ser representativo).	USEPA, 2000b	0.6
	Para las industrias que utilicen el sistema TCF, la cuantificación de la producción se realizará en ADt, medida antes de la primer etapa del blanqueo donde se descargue agua residual (USEPA, 2000b).		1.0

4.11 Azufre total reducido

Los compuestos que originan malos olores durante la producción de pulpa kraft, se conocen en conjunto como azufre total reducido (TRS). Esta clasificación incluye: ácido sulfhídrico, mercaptano de metilo, sulfuro de dimetilo y disulfuro de dimetilo (CNMA, 1999).

La mayor parte de los compuestos TRS son emitidos a la atmósfera; una pequeña fracción ingresa al efluente junto con los condensados de la etapa de digestión; sin embargo, es poco probable que esta emisión alcance niveles que ocasionen afectaciones al medio. Lo confirma la ausencia de antecedentes acerca de dificultades generadas por TRS. Por tal motivo, no se propone metodología para la estimación de estos compuestos.

4.12 Metales pesados

El acondicionamiento de fibras secundarias implica la necesidad de remover tintas, rellenos y materiales de revestimiento del papel recuperado. La etapa de destintado genera la mayor cantidad de contaminantes, ésta se estima en 20 kg (medidos como DQO) por tonelada de papel manejado (Environment Agency, 2000).

El contenido de tinta del material recuperado oscila entre 0.5 y 2%, cantidad que puede ser removida en un 85% mediante un sistema convencional de destintado (Felton, 1991). Algunas de las tintas utilizadas para la impresión del papel contienen metales pesados, estos compuestos representan el mayor problema de contaminación ocasionado por el acondicionamiento de fibras (Environment Agency, 2000).

La composición de las tintas depende de su uso; en general, se integran de un pigmento colorante que provoque el contraste y un vehículo que fluidice dicho pigmento durante su aplicación. Dentro de los pigmentos metálicos utilizados se pueden mencionar: sulfato ferroso (tinta para escritura); compuestos de plata (tintas indelebiles); óxido de fierro (tinta magnética); plomo, zinc, titanio y aluminio (pigmentos blancos); cromo y cadmio (pigmentos amarillos); y mercurio (pigmentos rojos) (Lederman, 2001).

Los metales pesados originan un gran número de efectos a la salud, son capaces de producir trastornos gastrointestinales, parálisis de miembros inferiores, afecciones pulmonares y renales, y daños al sistema nervioso central; siendo clasificados algunos de ellos como posibles carcinógenos y mutagénicos (USEPA, 2000d). Probablemente el caso más connotado de contaminación con metales pesados sea el de bahía Minamata en Japón, donde se registraron 111 muertes por envenenamiento con mercurio entre 1953 y 1960 (Henry y Heinke, 1999).

La mayoría de los metales pesados presenta baja biodegradabilidad y fotodegradabilidad; sin embargo, es poco probable que lleguen a alcanzar niveles críticos en los efluentes de esta industria, debido a que durante el tratamiento del efluente de 75 a 95% de éstos son transferidos al lodo residual (Environment Agency, 2000).

Para la ecuación de estimación de metales pesados, se utilizarán las emisiones promedio obtenidas por CNA en industrias celulósico-papeleras de México, mismas que se presentan en el cuadro 4.29. Además, con el fin de referenciar la magnitud de estas emisiones, se incluyen los límites máximos permisibles fijados en la NOM-001-ECOL-1996 para estos compuestos.

Cuadro 4.29		Emisión promedio de metales pesados, industria de la celulosa y papel	
Metales pesados y cianuro	Emisión media (mg/l)	LMP, promedio mensual NOM-001-ECOL-1996 (mg/l)	
Arsénico	0.222	0.1	
Cadmio	0.007	0.1	
Cianuros	0.002	1.0	
Cobre	0.037	4.0	
Cromo	0.208	0.5	
Mercurio	5E-04	0.005	
Níquel	0.052	2.0	
Plomo	0.069	0.2	
Zinc	0.161	10.0	

LMP: Limite Máximo Permissible

FUENTE: Adaptación libre de CNA (2000) y SEMARNAP (1997c).

Por otra parte, durante el acondicionamiento de fibras secundarias se han detectado compuestos fenólicos clorados, siendo el de mayor preocupación el pentaclorofenol (PCP). Las fuentes de dicho compuesto son: su uso como preservador de papel y el proceso de blanqueo de pulpa con cloro y sus compuestos. La Agencia Ambiental del Reino Unido propone, para la estimación de PCP en la etapa de acondicionamiento de fibras secundarias, un intervalo de emisión de 1 a 2 microgramos por litro de agua utilizada en dicho proceso (Environment Agency, 2000).

Para la definición de las ecuaciones de estimación, presentadas en el cuadro 4.3, se utilizaron los valores antes mencionados con las siguientes consideraciones (cuadro 4.30).

Cuadro 4.30		Consideraciones para la estimación metales pesados y PCP	
	Característica	Fuente de información	Factor de aplicabilidad
Metales pesados	Los valores del cuadro 4.29 fueron obtenidos para las industrias de México, por tanto, solo se requiere conocer el uso de agua.	Cuadro 4.29	0.6
Pentaclorofenol	Para estimar la emisión de pentaclorofenol se deberá multiplicar el valor de emisión propuesto por el volumen de agua utilizado en la recuperación de fibra secundaria.	Environment Agency, 2000	0.6
Uso de agua	Si no se cuenta con el uso de agua se podrá considerar, asumiendo el intervalo típico para las industrias kraft de América del Norte, entre 60 y 150 m ³ /ADt de pulpa producida (un valor de 120 m ³ /ADt puede ser representativo).	NCASI, 1993	0.6

Durante las etapas de formado y secado, existen emisiones al agua debidas a dos fuentes principales: los sobreflujos en el circuito de la máquina y el lavado de los equipos utilizados en el acondicionamiento de la pasta. El agua generada en esta fase, denominada agua blanca, contiene una cantidad considerable de materiales suspendidos y disueltos.

El material suspendido esta conformado por fibras, rellenos y pequeñas cantidades de encolantes; comúnmente la concentración de SST oscila en el intervalo de 20 a 100 kg/t de papel producida (Environment Agency, 2000). En tanto, los materiales disueltos incluyen productos de disolución de fibra como hemicelulosa, lignina y ácidos resinosos, más los aditivos no retenidos en las fibras como tintas, resinas y abrillantadores; la cantidad de estos materiales, determinada como DQO, se encuentra entre 5 y 50 kg/t de papel (Environment Agency, 2000). Aunado a ello, se han detectado emisiones de compuestos organoclorados; sin embargo, las cantidades reportadas normalmente son despreciables.

La mayoría de las sustancias generadas en esta etapa corresponden a productos utilizados en el acondicionamiento de la pasta para papel; a pesar de su cantidad, las emisiones al efluente final se consideran mínimas ya que por lo común, se cuenta con sistemas de recuperación para dichas sustancias.

Como se observa, los compuestos emitidos en esta etapa del proceso son cuantificados en forma colectiva como SST o DQO, careciéndose de información referente a alguna sustancia en particular. Por tal motivo, no se propone metodología de estimación.

Para ejemplificar la metodología de estimación propuesta en el cuadro 4.3, en el capítulo siguiente se presenta el cálculo de las emisiones a escala nacional. Para tal fin, primero se realiza el análisis de la información disponible, buscando determinar uno o varios escenarios probables que definan las características típicas de la industria mexicana. Una vez establecidos dichos escenarios, se realiza la estimación de emisiones y finalmente se presenta la distribución espacial de éstas, en el plano nacional.

Capítulo 5: Estimación de emisiones

Para ejemplificar la metodología propuesta, se realiza la estimación de emisiones de las sustancias listadas en el cuadro 4.1, a escala nacional. Como se mencionó a lo largo del capítulo anterior, la elección de los valores de estimación depende de las características que definen a las industrias para las cuales se estiman las emisiones de interés (tipo de proceso, materia prima utilizada y sistema de blanqueo); por tanto, primero se presenta un análisis de la industria celulósico-papelera mexicana, buscando determinar escenarios probables que representen sus características.

5.1 Análisis de información

La situación de la industria de celulosa y papel es un fiel reflejo del entorno nacional; con la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio el sector ha experimentado fuertes presiones, derivadas del alto nivel competitivo de las empresas de Estados Unidos y Canadá, advirtiéndose la necesidad de modernizar su infraestructura y tecnología. No obstante, persiste una marcada deficiencia en la planeación estratégica de largo plazo, que se refleja en la ineficiente utilización de recursos y los altos índices de contaminación de sus procesos; aunado a ello, la mala distribución de la planta productiva con relación a los recursos ha generado la incompetencia del sector en una economía de mercado y el cierre de varias empresas (Sanjuán, 1997).

Como se mencionó en el inciso 3.2.1, la producción de celulosa y papel en México se sustenta en 64 plantas, distribuidas como se indica en el cuadro 5.1. Dentro de la planta productiva, la manufactura de celulosa se concentra en solo 7 industrias ubicadas en 6 estados del país (CNICP, 2000b).

Cuadro 5.1		Plantas productoras de celulosa y papel en México					
Estados	Plantas			Estados	Plantas		
	Papel y celulosa	Papel	Total		Papel y celulosa	Papel	Total
Baja California Norte	-	1	1	Morelos	-	1	1
Chihuahua	1	1	2	Nuevo León	-	6	6
Coahuila	-	1	1	Oaxaca	1	-	1
Distrito Federal	-	7	7	Puebla	-	2	2
Durango	1	-	1	Querétaro	-	2	2
Guanajuato	-	1	1	San Luis Potosí	-	4	4
Jalisco	1	3	4	Sonora	-	1	1
Edo. de México	-	20	20	Tlaxcala	-	3	3
Michoacán	1	1	2	Veracruz	2	3	5

FUENTE: Adaptación libre de CNICP, 2000b.

En México se fabrica celulosa a partir de madera (blanda y dura) y bagazo de caña. La producción de los diferentes tipos de celulosa alcanzó un volumen de 526,244 toneladas durante 1999, que representan el 71.8% de la capacidad instalada (CNICP, 2000b). La distribución por tipos de celulosa se muestra a continuación (cuadro 5.2).

Cuadro 5.2		Producción de celulosa en México (1999)	
Tipo de celulosa		Toneladas	
TOTAL		526,244	
Celulosa de madera		344,100	
TMP*		13,915	
Química kraft		330,185	
Fibra larga		221,294	
Blanqueada		107,122	
Sin blanquear		114,172	
Fibra corta		108,891	
Blanqueada		108,891	
Sin blanquear		0	
Celulosa de otras fibras		182,144	
De bagazo		182,144	
Blanqueada		182,144	
Sin blanquear		0	
Otras fibras		0	

* Celulosa Termo Mecánica

FUENTE: Adaptación libre de CICEPLA, 1999.

La producción de celulosa mecánica representa 9% del total nacional, ésta es manufacturada en su totalidad en el estado de Oaxaca (CNICP, 2000b). Por su parte, el volumen correspondiente a la celulosa química (91%) es generado en 5 industrias, con la distribución que se muestra en el cuadro 5.3.

Cuadro 5.3		Distribución de la manufactura de celulosa química (1999)		
Materia prima	Estado	Numero de plantas	Porcentaje de la producción nacional	
Madera	Jalisco	1	15.4	
	Chihuahua	1	23.6	
	Michoacán	1	12.2	
Bagazo de caña	Michoacán		29.4	
	Veracruz	2	10.4	
TOTAL		5	91.0	

* En el estado de Durango se cuenta con otra industria que manufactura celulosa química; sin embargo, en el reporte no se incluyen sus datos.

FUENTE: Adaptación libre de CNICP, 2000b.

De acuerdo con el XV Censo Industrial (INEGI, 1999), en la producción de celulosa se utilizó un total de 959,226 m³ de madera (blanda y dura) y 264,207 toneladas de bagazo de caña.

Por otra parte, durante el mismo año se elaboraron 216,013 toneladas de fibras blanqueadas; de acuerdo con Sanjuán (1997), los sistemas predominantes de blanqueo en México son los basados en cloro y sus compuestos, que generalmente inician con la etapa de cloro elemental (alta eficiencia). Las secuencias utilizadas en los procesos kraft del país son CEDED y CEHDED¹ (Sanjuán, 1997). Consecuentemente, los agentes de blanqueo más empleados en México son cloro e hidróxido de sodio, con un consumo de 2,380,331 litros y 57,397,106 kilogramos durante 1999, respectivamente (INEGI, 1999).

Además de fibras vírgenes, en México se utiliza material de reciclaje para la elaboración de papel. Las fibras secundarias revisten una gran importancia para la industria papelera mexicana, ya que mediante su utilización éste sector ha crecido en los últimos diez años (Sanjuán, 1997). Durante 1999 el uso de materiales de reciclaje representó el 78% de la materia fibrosa consumida² (CNICP, 2000b). El volumen utilizado y los tipos de fibras secundarias que lo integran, se presentan en el cuadro 5.4.

Cuadro 5.4 Consumo de fibras secundarias en México (1999)	
Fibras secundarias	Toneladas
De color natural de la pasta	1 973 510
Blanco	760 556
Tarjeta tubular	4 029
Periódico impreso	335 509
Periódico sin impresión	299 622
Gris y otros	78 557
TOTAL	3 451 883

FUENTE: Adaptación libre de CNICP, 2000b.

El tipo de fibra secundaria y el material que se producirá con ésta, determinan los requerimientos de destintado y blanqueo. De acuerdo con información proporcionada por industrias mexicanas (ATCP, 1999), para producir papel de empaque y algunos otros tipos de baja calidad (servilletas o papel higiénico) no se requieren etapas de destintado y blanqueo, propiamente dichas. Cuando los requerimientos de calidad lo demandan, dichos procesos se llevan a cabo en una y hasta tres etapas, adicionando directamente en el pulper³ junto con la fibra alguno de los siguientes productos químicos: peróxido de hidrógeno, hipoclorito, silicato de sodio, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio. Además del hidróxido de sodio, el ácido sulfúrico es el producto de mayor utilización en esta industria con un consumo anual de 13,353,182 kilogramos (INEGI, 1999).

Con el conjunto combinado de celulosa y fibras secundarias, en 1999 se alcanzó una producción de 3,796,079 toneladas de los distintos tipos de papel (CNICP, 2000b). La producción de papel por grupos y su distribución por entidades federativas se indica en el cuadro 5.5.

¹ C = cloro elemental, E = hidróxido de sodio, D = dióxido de cloro y H = hipoclorito

² El total consumido incluye: celulosa química de madera, celulosa química de plantas anuales, pulpas mecánicas, otras celulosas (algodón, borra) y fibras secundarias.

³ El pulper es un recipiente metálico, de forma cilíndrica vertical, en cuyo fondo se encuentra un rotor o rodete, acoplado por lo general a un motor eléctrico. El continuo accionar de dicho rotor origina que los diferentes materiales en estado sólido se rompan dejando en libertad las fibras de celulosa.

Estados	Producción de papel por grupos y entidades federativas (1999)									
	Escritura e impresión		Empaque		Sanitario y facial		Especiales		Total	
	Cantidad (t)	%	Cantidad (t)	%	Cantidad (t)	%	Cantidad (t)	%	Cantidad (t)	%
Baja California Norte	-	-	24 220	1.1	19 383	2.9	-	-	43 603	1.1
Chihuahua	141 479	15.0	90 541	4.2	-	-	-	-	232 020	6.1
Coahuila	-	-	-	-	47 020	7.1	-	-	47 020	1.2
Distrito Federal	10 290	1.1	150 344	6.9	1 192	0.2	-	-	161 826	4.3
Durango	-	-	214 791	10.0	-	-	-	-	214 791	5.7
Jalisco	-	-	206 518	9.5	-	-	-	-	206 518	5.4
Edo. de México	87 685	9.3	698 903	32.2	209 089	31.6	6 777	31.6	1 002 454	26.4
Michoacán	113 631	12.0	-	-	35 059	5.3	-	-	148 690	4.0
Morelos	-	-	63 903	3.0	-	-	-	-	63 903	1.7
Nuevo León	13 659	1.4	382 350	17.6	34 481	5.2	9 980	46.5	440 470	11.6
Oaxaca	112 383	11.9	-	-	-	-	-	-	112 383	3.0
Puebla	-	-	22 203	1.0	6 795	1.0	-	-	28 998	0.8
Querétaro	107 221	11.3	189 070	8.7	112 999	17.1	-	-	409 290	10.8
San Luis Potosí	105 771	11.2	12 599	0.6	18 181	2.7	-	-	136 551	3.5
Sonora	-	-	62 100	2.9	-	-	-	-	62 100	1.6
Tlaxcala	-	-	6 912	0.3	65 289	10.0	4 700	21.9	76 901	2.0
Veracruz	253 330	26.8	43 197	2.0	112 034	16.9	-	-	408 561	10.8
TOTAL	945 449	100.0	2 167 651	100.0	661 522	100.0	21 457	100.0	3 796 079	100.0

FUENTE: CNICP, 2000b.

Para la mayoría de las expresiones de estimación mostradas en el cuadro 4.4, la información antes presentada resulta suficiente; sin embargo, la estimación de biocidas, metales pesados y pentaclorofenol en la máquina de papel requieren de otra serie de datos como: uso de agua por tonelada de papel producida, temperatura y pH del agua de proceso y efluente, y constantes de degradación para los compuestos utilizados.

Hasta el momento no se cuenta con este nivel de información. Valores reportados por el INDAR indican que las industrias pertenecientes al giro de la celulosa y papel (93 empresas registradas), emiten agua residual con valores de pH que oscilan entre 5.6 y 10.4, y temperaturas en el intervalo de 14 a 39°C (CNA, 2000). Sin embargo, la obtención de estos valores no considera un tipo de proceso o producto en particular, ni la actividad principal de las empresas, por lo que se les asignará un factor de aplicabilidad mínimo.

La misma situación se presenta en lo que concierne al uso de agua; las fuentes de información consultadas, como el INDAR (CNA, 2000) y el XV Censo industrial (INEGI, 1999), incluyen únicamente usos promedio diarios o anuales que no pueden ser utilizados para deducir los valores requeridos. Por último, tampoco se cuenta con información referente al manejo de biocidas, a pesar de que éstos son utilizados ampliamente en la industria nacional (ATCP, 1999).

5.2 Análisis de escenarios

Con base en los requerimientos de información para la realización de la estimación de emisiones y los tipos de industria predominantes en México, se han elaborado los siguientes escenarios (cuadro 5.6).

Cuadro 5.6		Posibles escenarios para las industrias de celulosa y papel mexicanas			
Industria	Parámetro	Industria 1	Industria 2	Industria 3	Industria 4
Producción de materia fibrosa	Materia prima utilizada	Madera blanda	Madera dura	Bagazo de caña	Fibra secundaria
	Producción [ADt]	-	-	-	-
	Sistema de blanqueo	Convencional	Convencional	-	-
	Uso de agua [m³/ADt]	120	120	-	30
Producción de papel	Producción del tipo o tipos de papel [t]	-	-	-	-
	Uso de agua [m³/t]	-	-	-	-
Ambas	Tipo y consumo de biocidas	-	-	-	-
	pH del agua de proceso	-	-	-	-
	pH del efluente	6.9	6.9	6.9	6.9
	Temperatura del agua de proceso	-	-	-	-
	Temperatura del efluente	24.5°C	24.5°C	24.5°C	24.5°C
	Nivel de tratamiento del efluente	-	-	-	-

Esta información es requerida actualmente en el formato de reporte COA, por lo que se espera disponer de ella cuando su informe sea obligatorio. En tanto, se debe mejorar la calidad y disponibilidad de la información contenida en otras bases de datos, para incrementar el factor de aplicabilidad de las estimaciones.

Con la información anteriormente presentada y las consideraciones expresadas en el capítulo anterior, se realiza a continuación la estimación de emisiones a escala nacional.

5.3 Estimación de emisiones

Las expresiones de estimación mostradas en el cuadro 4.4, requieren información concerniente al tipo de blanqueo y sistema de tratamiento para agua residual utilizados, a fin de determinar los valores de emisión a emplear y la cantidad de celulosa manejada.

Como se ha mencionado, los sistemas de blanqueo predominantes en México son los basados en cloro y sus compuestos (Sanjuán, 1997), por lo que se puede asumir una pérdida de fibras del 8% durante el mismo (USEPA, 2000b). En lo que concierne a los sistemas de tratamiento para efluentes, se acepta el peor de los escenarios (que no se cuenta con sistema de tratamiento) ya que no se dispone de información al respecto.

Estas consideraciones aplican a todas las expresiones de emisión, su factor de aplicabilidad se muestran en el cuadro 5.7.

Cuadro 5.7		Consideraciones para la estimación de emisiones		
Parámetro	Consideración	Fuente	Factor de aplicabilidad	
Sistema de blanqueo	Convencional	Sanjuán, 1997	0.8	
Pérdida debida al blanqueo (%)	8	USEPA, 2000b	0.8	
Nivel de tratamiento para el efluente	Ninguno	Suposición	0.6	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Para ejemplificar el cálculo realizado, se desglosa enseguida la determinación de las emisiones de ácidos resinosos.

5.3.1 Ácidos resinosos

Se mencionó en el inciso 4.3 que la emisión de ácidos resinosos depende de diversos factores como el tipo de materia prima utilizada, las variantes en el proceso kraft y el tratamiento del efluente. A pesar de la carencia de información referente a las características del proceso kraft utilizado en México, se considera que no presenta grandes variaciones respecto de los sistemas empleados en otros países, ya que la tecnología utilizada en México es, en su mayoría, de "importación".

De acuerdo con el cuadro 5.2, el volumen de fibra larga producido durante 1999 ascendió a 221,294 ADt; considerando la pérdida debida al blanqueo el volumen realmente manejado es:

$$\text{Fibra larga manejada} = \frac{221,294}{(1-0.08)} = 240,536 \text{ ADt}$$

Asumiendo que no existe tratamiento del efluente, el valor de N_1 para la expresión de estimación mostrada en el cuadro 4.4 será de 0. Sustituyendo estos valores y la emisión media propuesta para el ácido resinoso abiótico, se obtiene una emisión anual de:

$$E_{AR} = \left[\frac{9.49 \text{ g/ADt}}{(1-0.80)} \right] (1-0)(240,536 \text{ ADt/año}) = 11,413,478 \text{ g/año}$$

E_{AR} = emisión de ácido abiótico en gramos por año
 9.49 = Emisión media, cuadro 4.4

En el cuadro 5.8 se puede observar las emisiones estimadas. Cabe señalar que la segunda columna, denominada "valores normalizados", corresponde a la emisión media multiplicada por el cociente $(1 - N_0)/(1 - N_1)$, que representa el valor de emisión para las condiciones de la industria en particular.

Cuadro 5.8		Cálculo de emisiones al agua de ácidos resinosos		
Acido resinoso	Emisión media g/ADt	Valores normalizados g/ADt	Emisión kg/año	Factor de aplicabilidad
Abiótico	9.49	47.45	11 413.48	0.6
Dihidroxiabiótico	9.31	46.55	11 197.00	
Neobiótico	1.82	9.10	2 188.89	
Pimárico	2.06	10.30	2 477.53	
Isopimárico	10.39	51.95	12 495.89	
Sandaracopimárico	6.22	31.10	7 480.70	
Palústrico	4.32	21.60	5 195.60	
TOTAL			52 449.08	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

El siguiente paso será ubicar la emisión estimada en el plano nacional, para lo cual se debe definir la utilización de madera blanda en el país. Con base en información proporcionada por CNICP (2000b) y ATPC (1999), se ha podido determinar la siguiente distribución (cuadro 5.9).

Cuadro 5.9		Distribución de la emisión de ácidos resinosos			
Estado	Fibra larga %	Fibra corta %	Total %	Emisión de ácidos resinosos kg/año	
Chihuahua	57.7	4.0	36.7	30 263.12	
Jalisco	33.8	5.1	23.9	17 727.79	
Michoacán	8.5	46.9	25.3	4 458.17	
Oaxaca	0.0	44.0	14.1	0	
TOTAL	100.0	100.0	100.0	52 449.08	

Con esta información se elaboró la figura 5.1, que muestra la participación por estados en la emisión de ácidos resinosos para 1999. Con base en las consideraciones asumidas, la estimación realizada cuenta con un factor de aplicabilidad de 0.6 (correspondiente al mínimo factor de aplicabilidad utilizado). Mediante este procedimiento se calculan las emisiones para el resto de las sustancias listadas, indicándose al inicio de cada sección las consideraciones particulares para cada caso.

5.3.2 Ácidos grasos

Como se mencionó en el inciso 4.4, los ácidos grasos se encuentran contenidos en maderas blandas y duras; por tanto, para la estimación de emisiones se considera la manufactura de celulosa con ambos tipos de madera (330,185 ADt, según el cuadro 5.2). El resumen de los resultados obtenidos se presenta en el cuadro 5.10. La figura 5.2 muestra la distribución de las emisiones de ácidos grasos en el territorio nacional.

Cuadro 5.10		Cálculo de emisiones al agua de ácidos grasos		
Acido graso	Emisión media g/ADt	Valores normalizados g/ADt	Emisión kg/año	Factor de aplicabilidad
Oleico	0.80	4.00	1 435.59	0.6
Linoleico	0.83	4.15	1 489.42	
Linolénico	3.56	17.80	6 388.36	
Palmitico	3.69	18.45	6 621.64	
TOTAL			15 935.01	

5.3.3 Dioxinas y furanos

La emisión de dioxinas y furanos se calcula con base en la producción de celulosa blanqueada, 216,013 ADt según lo indicado en el cuadro 5.2; considerándose un uso promedio de 120 m³ de agua por ADt producida (NCASI, 1993). Además, se debe tomar en cuenta la cantidad que se emite.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

junto con el lodo de tratamiento, ya que los valores de emisión propuestos se encuentran desglosados en esa forma. Para ello se asume una generación promedio de lodo de 100 kg/ADt, de acuerdo con Environment Agency (2000). Los resultados de la estimación se muestran en el cuadro 5.11, mientras que su distribución espacial se incluye en la figura 5.2.

Cuadro 5.11		Cálculo de emisiones al agua de dioxinas y furanos		
Dioxinas y furanos	Emisión media	Valores normalizados	Emisión g/año	Factor de aplicabilidad
Pulpa blanqueada	µg/ADt	µg/ADt		0.6
2,3,7,8-TCDD	6.4	6.40	1.50	
2,3,7,8-TCDF	18	18.00	4.23	
Lodo de tratamiento	µg/t	µg/t		
2,3,7,8-TCDD	63	63.00	1.48	
2,3,7,8-TCDF	233	233.00	5.47	
Efluente	pg/l	pg/l		
2,3,7,8-TCDD	42	190.91	5.38	
2,3,7,8-TCDF	120	545.45	15.37	
TOTAL			33.43	

5.3.4 Compuestos fenólicos clorados

La emisión de compuestos fenólicos clorados depende del tipo de madera utilizada en la fabricación de celulosa; los valores de estimación propuestos en el inciso 4.7 fueron obtenidos para producción de fibra larga. De acuerdo con el cuadro 5.2, la elaboración de este tipo de celulosa alcanzó un total de 107,122 ADt en 1999. El resultado del cálculo se muestra en el cuadro 5.12 y su distribución por estados se indica en la figura 5.3.

Cuadro 5.12		Cálculo de emisiones al agua de compuestos fenólicos clorados		
Compuesto fenólico clorado	Emisión media g/ADt	Valores normalizados g/ADt	Emisión kg/año	Factor de aplicabilidad
3,4,5-tricloroguayacol	5.945	11.89	1 384.44	0.6
3,4,6-tricloroguayacol	1.174	2.35	273.39	
4,5,6-tricloroguayacol	1.232	2.46	286.90	
2,4,6-triclorofenol	0.986	1.97	229.61	
Tetraclorocatecol	3.596	7.19	837.41	
Tetracloroguayacol	6.423	12.85	1 495.75	
2,3,4,6-tetraclorofenol	0.362	0.72	84.30	
Pentaclorofenol	0.159	0.32	37.03	
TOTAL			4 628.83	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

5.3.5 Halógenos orgánicos adsorbibles (AOX)

Para la estimación de compuestos organoclorados, determinados como AOX, se cuenta con valores de emisión que consideran la utilización de madera blanda y dura (cuadro 4.21). Por tal motivo, se calculan por separado las emisiones causadas por la producción de fibra larga blanqueada (107,122 ADt) y las debidas a la manufactura de fibra corta blanqueada (108,891 ADt). Los resultados obtenidos se presenta en el cuadro 5.13 y su distribución espacial se incluye en la figura 5.3.

Cuadro 5.13		Cálculo de emisiones al agua del indicador AOX		
AOX	Emisión media kg/ADt	Valores normalizados kg/ADt	Emisión t/año	Factor de aplicabilidad
AOX fibra larga	10	10	1 164.37	0.6
AOX fibra corta	5	5	591.80	
TOTAL			1 756.17	

5.3.6 Ácidos resinosos clorados

De acuerdo con lo expresado en el inciso 4.9, la emisión de ácidos resinosos clorados depende de la utilización de madera blanda (*softwood*) y de sistemas de blanqueo basados en cloro y sus compuestos. Como se mencionó en el inciso anterior, la producción de este tipo de celulosa alcanzó un volumen de 107,122 ADt durante 1999. Las emisiones calculadas se presentan en el cuadro 5.14 y su distribución por entidades federativas se indica en la figura 5.3.

Cuadro 5.14		Cálculo de emisiones al agua de ácidos resinosos clorados		
Acido resinoso clorado	Emisión media g/ADt	Valores normalizados g/ADt	Emisión kg/año	Factor de aplicabilidad
12-clorodihidroabiético	0.543	0.68	79.03	0.6
14-clorodihidroabiético	0.533	0.67	77.58	
12,14-diclorodehidroabiético	0.512	0.57	66.24	
TOTAL			222.85	

5.3.7 Cloroformo

La emisión de cloroformo es calculada con base en la producción total de celulosa blanqueada, es decir, 216,013 ADt producidas. Enseguida se presenta el resultado del cálculo (cuadro 5.15) y su distribución espacial se incluye en la figura 5.2.

Cuadro 5.15		Cálculo de emisiones al agua de cloroformo		
Cloroformo	Emisión media kg/ADt	Valores normalizados kg/ADt	Emisión t/año	Factor de aplicabilidad
Cloroformo	0.5	0.5	117.40	0.6
TOTAL			117.40	

5.3.8 Metales pesados

Los valores propuestos para calcular las emisiones de metales pesados fueron obtenidos para las condiciones de México; por tal motivo, únicamente se requiere conocer el uso de agua por tonelada de papel producida. Hasta el momento no se cuenta con información específica para los diferentes tipos de papel elaborados; valores reportados por industrias mexicanas (ATCP, 1999), así como el cálculo del volumen utilizado por esta actividad industrial, se presentan a continuación en el cuadro 5.16.

Cuadro 5.16		Volumen de agua utilizado en la producción de papel		
Tipo de papel	Uso de agua, (m ³ /t de papel)*	Producción en 1999 (t)	Volumen utilizado (miles de m ³)	Factor de aplicabilidad
Escritura e impresión	70	945 449	66 181.43	0.6
Empaque	20	2 167 651	43 353.02	
Sanitario y facial	30	661 522	19 845.66	
Especiales	150	21 457	3 218.55	
TOTAL		3 796 079	132 598.66	

* Los datos del uso de agua fueron proporcionados por socios de ATCP.

Con base en el volumen total utilizado, se calcula a continuación la emisión de metales pesados al agua (cuadro 5.17); su distribución por entidades federativas se incluye la figura 5.4.

Cuadro 5.17		Cálculo de emisiones al agua de metales pesados		
Metales pesados	Emisión media mg/l	Valores normalizados mg/l	Emisión kg/año	Factor de aplicabilidad
Arsénico	0.222	0.222	29 436.90	0.6
Cadmio	0.007	0.007	928.19	
Cianuros	0.002	0.002	265.20	
Cobre	0.037	0.037	4 906.15	
Cromo	0.208	0.208	27 580.52	
Mercurio	5E-04	5E-04	66.30	
Níquel	0.052	0.052	6 895.13	
Plomo	0.069	0.069	9 149.31	
Zinc	0.161	0.161	21 348.38	
TOTAL			100 576.08	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

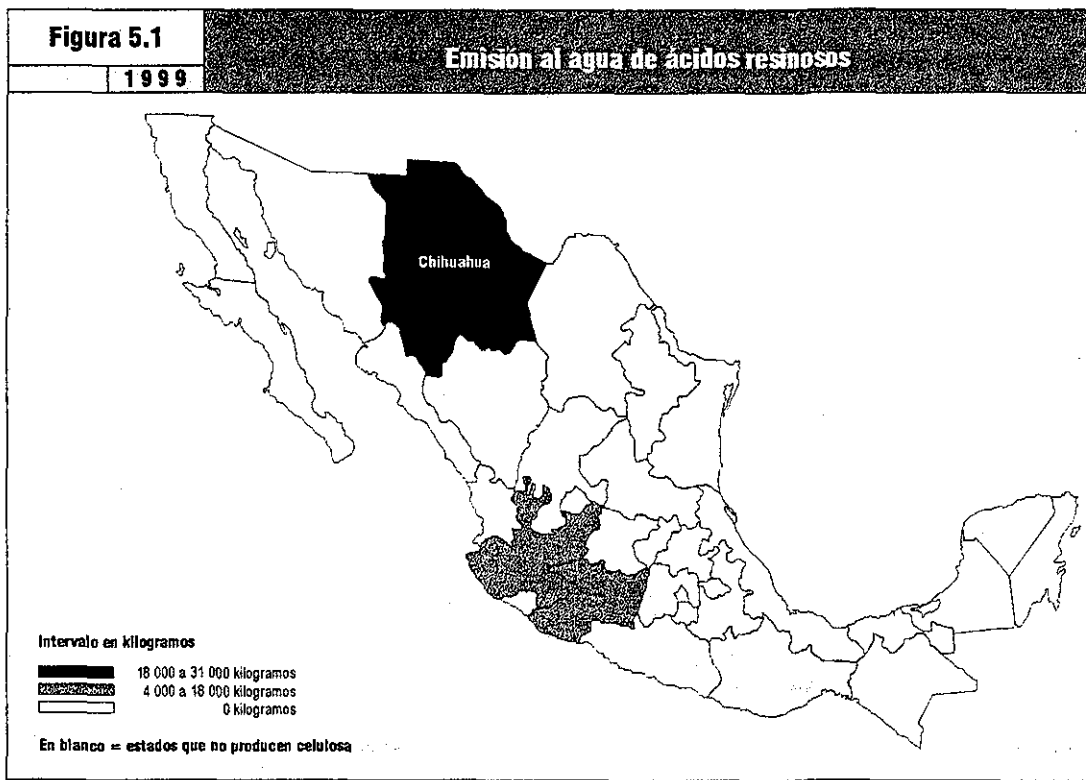
5.3.9 Pentaclorofenol

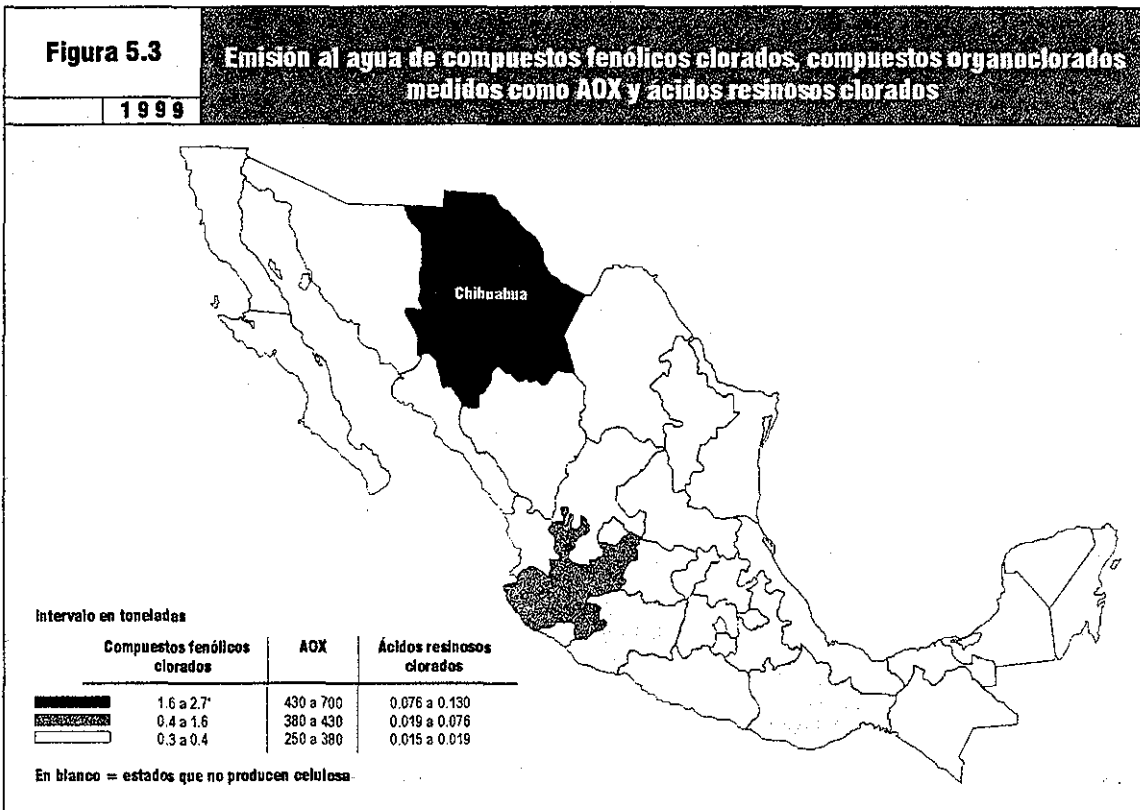
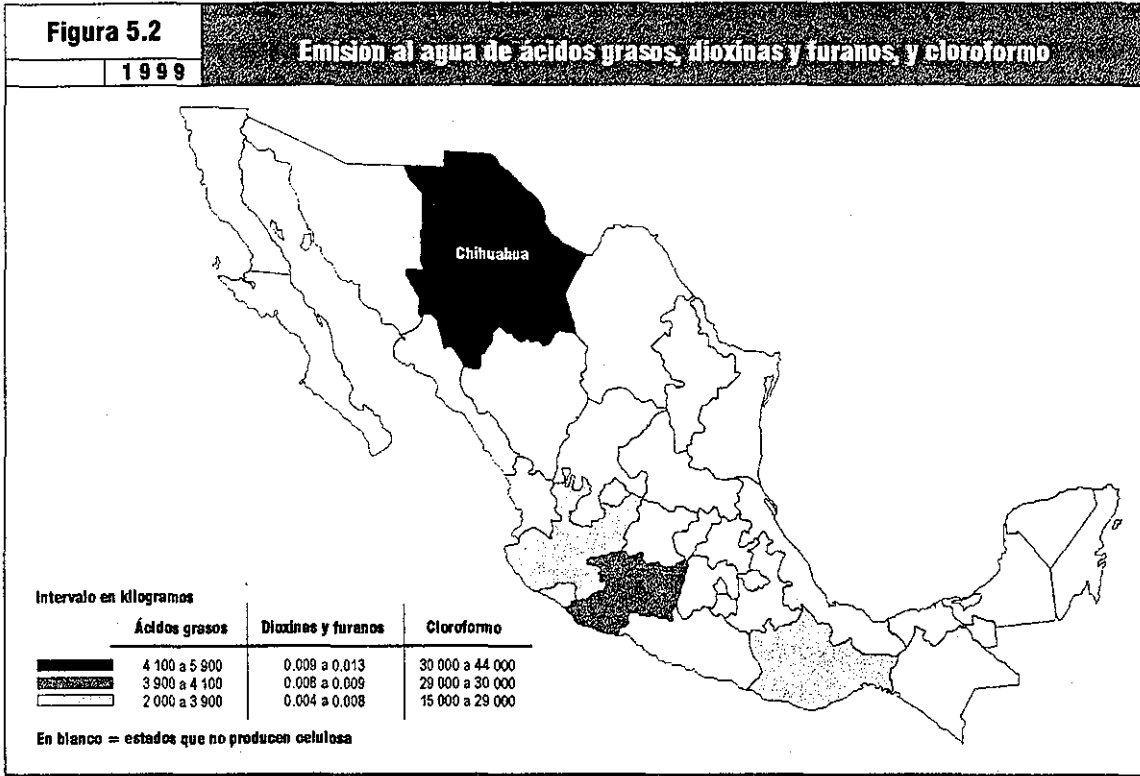
De la misma forma que para los metales pesados, se utiliza el uso de agua obtenido en el cuadro 5.16 para calcular las emisiones de pentaclorofenol (cuadro 5.18). Su distribución espacial se muestra en la figura 5.4.

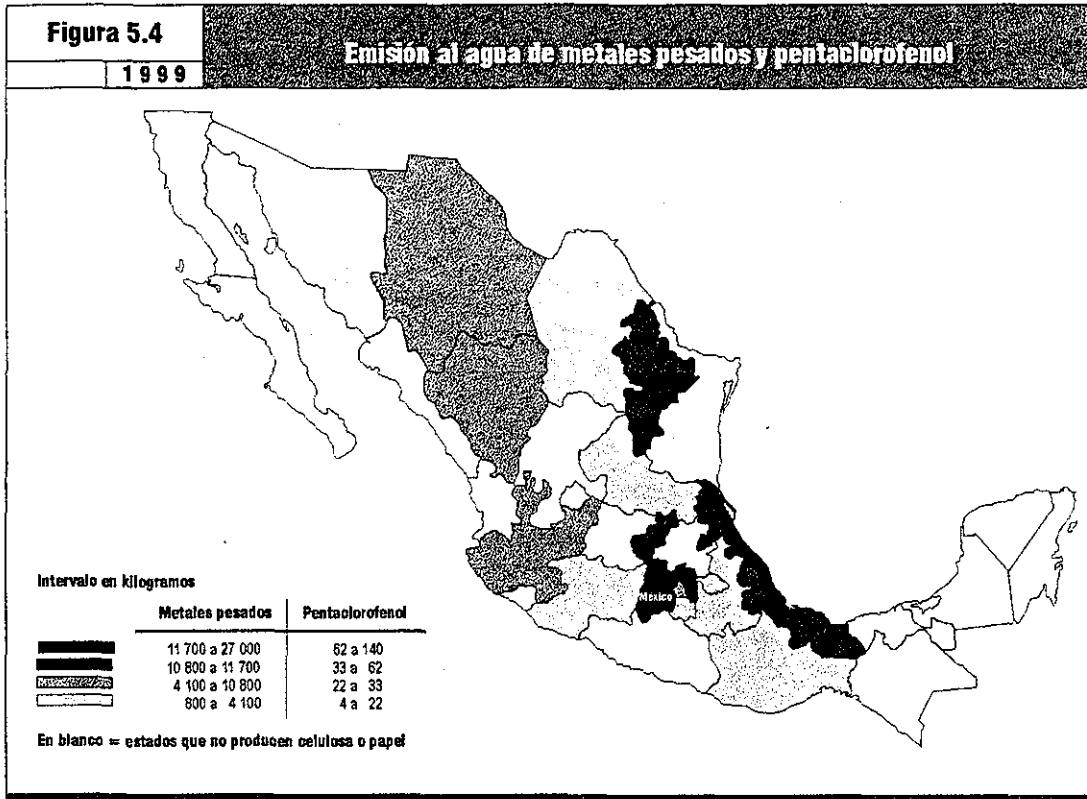
Cuadro 5.18		Cálculo de emisiones al agua de pentaclorofenol		
Pentaclorofenol	Emisión media $\mu\text{g/l}$	Valor normalizado $\mu\text{g/l}$	Emisión kg/año	Factor de aplicabilidad
Pentaclorofenol	2	2	530	0.6
TOTAL			530	

5.4 Resultados

La distribución geográfica de la emisión al agua de ácidos resinosos se presenta en la figura 5.1; las emisiones de ácidos grasos, dioxinas y furanos, y cloroformo se incluyen en la figura 5.2; las descargas al agua de compuestos fenólicos clorados, compuestos organoclorados medidos como AOX y ácidos resinosos clorados se indican en la figura 5.3; mientras que la emisión al agua de metales pesados y pentaclorofenol se muestran en la figura 5.4.







Enseguida se presenta el resumen de las emisiones estimadas (cuadro 5.19), mismas que se encuentran desglosadas por especie química.

Como se recordará, el indicador AOX incluye aquellos compuestos organoclorados que no han sido identificados o estudiados a detalle. De acuerdo con Santamarta (2000), éstos podrían contabilizar hasta 11,000 compuestos. Por tal motivo, en el cuadro-resumen se incluyen dos integraciones de emisiones: la primera es obtenida al sumar los compuestos por especie química (34 compuestos), es decir, sin considerar al indicador AOX; mientras que la segunda se obtiene al contabilizar los compuestos organoclorados mediante dicho parámetro (20 compuestos más el indicador AOX).

La distribución por entidades federativas se muestra en las figuras 5.5 y 5.6, que se ubican a continuación del cuadro-resumen.

La discusión de resultados se presenta al final del capítulo.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Emisiones al agua por la producción de celulosa y papel en México (kg/año)																				
Estado	Abético	Dihidroxiabético	Neobético	Pimérico	Isopimérico	Sandaracopimérico	Palústrico	Oleico	Linoleico	Linolénico	Palmitico	2,3,7,8-TCDD *	2,3,7,8-TCDF *	3,4,5-tricloroguaiacol	3,4,6-tricloroguaiacol	4,5,6-tricloroguaiacol	2,4,6-triclorofenol *	Tetraclorocatecol	Tetracloroguaiacol	
Baja California Norte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chihuahua	6 586	6 461	1 263	1 430	7 210	4 316	2 998	527	547	2 345	2 430	0.003	0.009	799	158	166	132	483	863	0
Coahuila	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Distrito Federal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Durango	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jalisco	3 858	3 785	740	837	4 224	2 528	1 756	343	356	1 527	1 583	0.002	0.006	468	92	97	78	283	506	0
México	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Michoacán	970	952	186	211	1 062	636	442	363	377	1 616	1 675	0.002	0.006	118	23	24	20	71	127	0
Morelos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nuevo León	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oaxaca	0	0	0	0	0	0	0	202	210	901	934	0.001	0.004	0	0	0	0	0	0	0
Puebla	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Queretaro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
San Luis Potosí	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sonora	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tlaxcala	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Veracruz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	11 413	11 197	2 189	2 478	12 496	7 481	5 196	1 436	1 489	6 388	6 622	0.008	0.025	1 384	273	287	230	837	1 496	0

* Sustancias contenidas en la lista RETC.

Cuadro 5.19 Emisiones al agua por la producción de celulosa y papel en México (kg/año) (continuación)

Estado	2,3,4,6-tetraclorofenol *	Pentaclorofenol †	AOX	12-clorodidihidroarabético	14-clorodidihidroarabético	12,14-diclorodihidroarabético	Cloroforno *	Arsénico *	Cadmio *	Cianuros *	Cobre *	Cromo *	Mercurio *	Níquel *	Plomo *	Zinc *	Emisión total por especie ‡	Emisión total *
Baja California Norte	0	6	0	0	0	0	0	324	10	3	54	303	1	76	101	235	1 112	1 106
Chihuahua	49	54	695 513	46	45	38	43 085	1 796	57	16	299	1 682	4	421	558	1 302	88 163	737 760
Coahuila	0	6	0	0	0	0	0	353	11	3	59	331	1	83	110	256	1 213	1 207
Distrito Federal	0	23	0	0	0	0	0	1 266	40	11	211	1 186	3	296	393	918	4 348	4 325
Durango	0	30	0	0	0	0	0	1 678	53	15	280	1 572	4	393	522	1 217	5 763	5 733
Jalisco	28	41	423 739	27	26	22	28 058	1 590	50	14	265	1 489	4	372	494	1 153	56 694	450 706
México	0	140	0	0	0	0	0	7 771	245	70	1 295	7 281	18	1 820	2 415	5 636	26 692	26 552
Michoacán	7	24	376 525	7	7	6	29 702	1 177	37	11	196	1 103	3	276	366	854	42 648	389 038
Morelos	0	9	0	0	0	0	0	500	16	5	83	469	1	117	156	363	1 719	1 710
Nuevo León	0	62	0	0	0	0	0	3 415	108	31	569	3 199	8	800	1 061	2 476	11 728	11 667
Oaxaca	0	16	260 392	0	0	0	16 553	883	28	8	147	827	2	207	274	640	21 833	285 656
Puebla	0	4	0	0	0	0	0	235	7	2	39	221	1	55	73	171	809	805
Querétaro	0	57	0	0	0	0	0	3 179	100	29	530	2 979	7	745	988	2 306	10 919	10 862
San Luis Potosí	0	49	0	0	0	0	0	1 030	32	9	172	965	2	241	320	747	3 539	3 520
Sonora	0	8	0	0	0	0	0	471	15	4	78	441	1	110	146	342	1 618	1 609
Tlaxcala	0	11	0	0	0	0	0	589	19	5	98	552	1	138	183	427	2 022	2 012
Veracruz	0	57	0	0	0	0	0	3 179	100	29	530	2 979	7	745	988	2 306	10 919	10 862
TOTAL	84	567	1 756 168	79	78	66	117 398	29 437	928	265	4 906	27 581	66	6 895	9 149	21 348	291 740	1 925 129

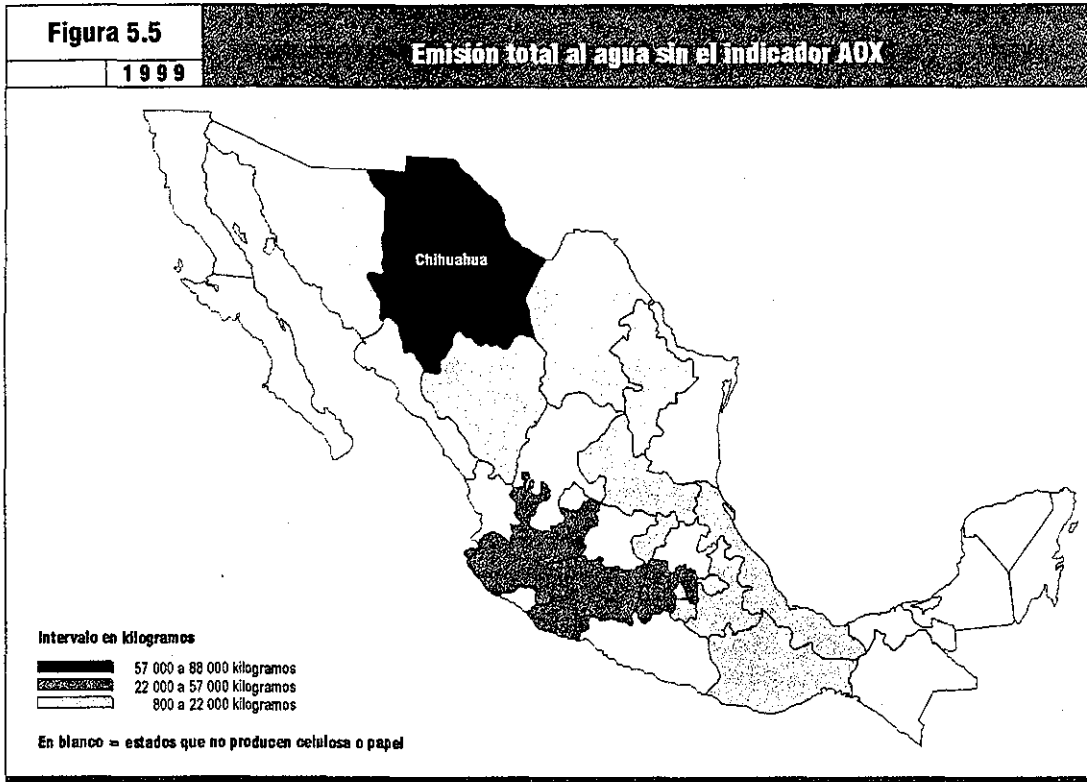
* Sustancias contenidas en la lista RETC.

† Incluye la emisión generada durante la manufactura de celulosa y la utilización de fibras secundarias.

‡ Emisión total considerando los compuestos organoclorados por especie, es decir, sin contabilizar al indicador AOX.

* Emisión total considerando los compuestos organoclorados medidos como AOX.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.5 Discusión de resultados

- ♦ La estimación realizada permite tener una visión global de las emisiones contaminantes al agua, generadas por la industria de la celulosa y papel en México.
- ♦ Durante la aplicación de la metodología de estimación se presentaron algunas limitaciones, todas ellas relacionadas con la carencia de información.
- ♦ La falta de información concerniente al tipo de sistemas de tratamiento utilizados en esta industria, originó que los valores de emisión empleados fuesen considerados para el peor de los escenarios. Esta situación limitó el factor de aplicabilidad de las estimaciones a 0.6.
- ♦ Además, la poca definición concerniente a la producción de celulosa mediante los distintos tipos de materia prima empleados, produjo que la resolución espacial de las emisiones no se llevara a cabo en forma detallada.
- ♦ La mayor dificultad se presentó en la estimación de sustancias para las cuales se requiere de un uso de agua, como es el caso de metales pesados y pentaclorofenol, ya que no se cuenta con esta información para los diferentes productos manufacturados en México. La estimación de estos compuestos se realizó considerando la información proporcionada por 3 industrias mexicanas, por lo que su aplicabilidad para el contexto nacional puede no ser representativa.
- ♦ Por otra parte, la estimación de biocidas no fue realizada debido a la carencia de información referente al tipo de productos utilizados para tal fin.

Aceptando que las estimaciones presentan un bajo factor de aplicabilidad, se pueden resaltar los siguientes resultados:

- ♦ La actividad celulósico papelera mexicana abarca 17 estados de la república.
- ♦ 7 industrias son las responsables de la producción total de celulosa en México, en tanto que la generación de papel corre a cargo de 64 empresas.
- ♦ Las principales emisiones en 1999 fueron: cloroformo (117,398 kg), arsénico (29,437 kg) cromo (27,581 kg) y zinc (21,348 kg).
- ♦ Una tercera parte de las emisiones de metales pesados se produce en el Estado de México y prácticamente la mitad de las emisiones de compuestos organoclorados se generan en Chihuahua.
- ♦ En 1999 dos tercios de las emisiones al agua contabilizándolas por especie química, producto de esta actividad industrial, se originó en los estados de Chihuahua, Jalisco, Michoacán y Estado de México.

- ♦ En 1999 el 90% de las emisiones, considerando la emisión de los compuestos organoclorados como AOX, se concentraron en los estados de Chihuahua, Jalisco, Michoacán y Oaxaca.

A pesar de las limitaciones, se considera que el factor de aplicabilidad puede ser mejorado en el corto plazo, ya que la mayoría de los datos faltantes son de uso común en la industria.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

Se presentan a continuación las conclusiones y recomendaciones derivadas de la realización de este trabajo, de acuerdo con el objetivo planteado al inicio del mismo.

Conclusiones

- ♦ Los registros con información ambiental (PRTR) han demostrado, en el ámbito internacional, su eficacia como instrumentos de gestión. Con el establecimiento de estos sistemas de información se ha logrado cumplir muchos objetivos ambientales y se ha abierto un amplio rango de posibilidades.
- ♦ El registro de emisiones de México, RETC, luego de 4 ciclos de reporte, no ha logrado ser implantado en su totalidad debido al escaso o incorrecto reporte de emisiones. Los principales factores que contribuyen a tal situación son: el carácter voluntario del reporte de las sustancias listadas, la falta de personal calificado para la determinación de las emisiones y la escasa utilización de técnicas de estimación indirecta.
- ♦ Este entorno ha originado la necesidad de contar con instrumentos alternos, que apoyen la obtención de información y que sirvan para corroborar los valores reportados. Situación que se ha llevado a la práctica en la conformación del INDAR, donde se ha utilizado la técnica de extrapolación para determinar la información faltante.
- ♦ En México las actividades industriales que emplean grandes cantidades de agua y generan elevadas concentraciones de contaminantes son: la industria química, la producción de celulosa y papel, la actividad metal-mecánica, los ingenios azucareros, la industria del petróleo, la manufactura curtiembre y la minería.
- ♦ El proceso kraft es el más utilizado en México para la producción de celulosa. La manufactura de celulosa y papel se puede sintetizar en 4 diagramas de operación y funcionamiento: producción de celulosa, recuperación de reactivos químicos, producción de papel y servicios auxiliares.
- ♦ En esta actividad industrial se identifican 35 puntos de generación y/o emisión de contaminantes a los diferentes medios. La adición de contaminantes al agua se produce en 12 de ellos.

- ♦ Los contaminantes generados en el proceso se pueden agrupar en: extractos de madera disueltos, sólidos en suspensión, compuestos organoclorados, compuestos TRS y compuestos orgánicos volátiles. La mayor parte de las sustancias emitidas al agua durante el proceso es integrada por compuestos organoclorados, clasificados en su mayoría como cancerígenos y mutagénicos.
- ♦ En el ámbito internacional, la normatividad relacionada con esta actividad industrial define a 40 sustancias como *ambientalmente preocupantes*. En México no se cuenta con una normatividad específica para este proceso.
- ♦ La importancia de esta industria en países como Estados Unidos y Canadá, ha promovido la determinación de rangos probables de emisión de los compuestos identificados, mismos que han sido empleados para establecer regulaciones y completar la información faltante en sus registros de emisiones.
- ♦ Debido a las características del proceso y al número de variables que intervienen en la estimación de la emisión de cada sustancia identificada, se propone el llamado cálculo de ingeniería como la técnica factible para la estimación de dichas emisiones.
- ♦ El cálculo de ingeniería propuesto se basa en la utilización de valores medios de emisión observados, para las sustancias definidas. Estos valores se normalizan para condiciones particulares y se asocian a un nivel de actividad; en este caso, producción de celulosa y consumo de agua.
- ♦ Con excepción de los valores de emisión para metales pesados, el resto de los datos proviene de estudios realizados en otros países, por lo que la aplicabilidad de estos valores queda sujeta a su evaluación y calibración para las condiciones de México.
- ♦ La metodología de estimación propuesta se empleó solo de manera parcial, debido a la falta de información. La resolución espacial de las emisiones fue acotada por este factor.
- ♦ La utilización de métodos indirectos permitió estimar para la industria de la celulosa y papel la emisión de contaminantes, cuya medición no está normada en México.
- ♦ Metodologías similares a la presentada en este trabajo se emplean en países como Finlandia, en donde, a pesar de estar normada la medición de emisiones al agua de todos los contaminantes aquí identificados, existe un creciente interés por la predicción a través de métodos indirectos, en busca de anticipar posibles eventos ambientales.
- ♦ Finalmente, se puede señalar que a pesar de las limitaciones se logró el objetivo planteado al inicio del trabajo, ya que se pudo establecer un formato para la estimación de emisiones. Éste puede ser mejorado en el futuro con la información específica que requiere.

Recomendaciones

- ♦ Se recomienda que la obtención de información se realice atendiendo a las características importantes de cada actividad industrial. Es importante dejar atrás el enfoque tradicional que propugna la obtención de estadísticas totales, que en la mayoría de los casos no tienen una aplicación práctica.
- ♦ Este cambio de enfoque no debe representar un gran reto para los organismos encargados de realizar el acopio de información, ya que, como se pudo observar, la metodología de estimación propuesta requiere de información global del proceso. Por tanto, los esfuerzos de dichos organismos deben coordinarse para la obtención de estos datos.
- ♦ Se recomienda continuar mejorando y completando la información requerida por el método de estimación aquí propuesto y determinar directamente la emisión de alguna sustancia para corroborar el factor de aplicabilidad de los valores de emisión propuestos.
- ♦ Se invita a extrapolar esta metodología a otras actividades industriales, en busca de mejorar la obtención de información en México.

- Alberta Environment, (1996) "Assessment of Long Yard Runoff in Alberta". Prepared by: S. McDougall, Environmental Service, June 1996.
- Allsopp, M.; Thornton, J.; y Costner, P. (1994) "Cero dioxinas, una estrategia de urgencia para la eliminación progresiva de las dioxinas". Publicado por Greenpeace Internacional. Versión en castellano, equipo de Greenpeace España.
- ANDI, (2000) "Consumo aparente de pastas celulósicas, papeles y cartones 1999". Asociación Nacional de Industrias. Colombia. <http://www.andi.com.co/camaras/default.htm>.
- ATCP, (1999) "XXXIII Curso básico de celulosa, papel y laboratorio". Asociación Mexicana de Técnicos de las Industrias de la Celulosa y del Papel, A.C. Octubre 1999.
- Birge, W.; Black, J. y Bruser, D. (1979) "Toxicity of organic chemicals to embryo-larval stages of fish". United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C. (EPA-560/11-79-007).
- Bright, D.; Lehtinen, K.; McKague B. y Rodgers J. (1998) "Evaluation of Ecological Risks Associated with the use of Chlorine Dioxide for the Bleaching of Pulp, Scientific Progress Since 1993". <http://aet.org/science/sap98/sap97sec2.html>
- Brownlee, B. y Strachan, M. (1974) "Persistent Organic Compounds from a Pulp Mill in a Near-Shore Freshwater Environment". Canada Center for Inland Waters. Burlington, Ontario. pp 661-669.
- Bryce, J. (1991) "Alkaline pulp production". En: Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology. Casey, P. Third Edition, Vol. I, John Wiley & Sons. N.Y.
- Casey, P. (1991) "Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology". Third Edition, Vol. I, II y III. John Wiley & Sons. N.Y.
- CCA, (1998) "Expediente de nominación sobre dioxinas y furanos" Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte. Canadá. http://www.cec.org/programs_projects/pollutants_health/smoc/dioxfur.cfm?varlan=espanol#Destinoenel agua
- CCA, (2000) "En balance: emisiones y transferencias de contaminantes en América del Norte, 1997". Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte, publicado en mayo de 2000. Canadá. http://www.cec.org/pubs_info_resources/publications/protect_human_enviro/tak97.cfm?varlan=espanol
- CEPA, (1999) "National Pollutant Release Inventory, About the NPRI 1999". Canadian Environmental Protection Act, Minister of Public Works and Government Services. Canada. <http://www.ec.gc.ca/pdb/npri/>
- CEPA, (2000) "Priority Substances List, Assessment Report: Chloroform". Canadian Environmental Protection Act, June 2000.

- CHHS, (1999) "Volume 2, Decision Making in Environmental Health Impact Assessment". Canadian Handbook On Health Impact Assessment, Draft. December 1999.
- CICEPLA, (1999) "Producción de pastas celulósicas, papeles, cartones y cartulinas en 1999". Confederación Industrial de la Celulosa y del Papel en Latinoamérica, comisión II - estadísticas. Colombia. <http://www.andi.com.co/camaras/default.htm>.
- CNA, (1995) "Programa Hidráulico 1995 - 2000". Comisión Nacional del Agua. México. <http://www.cna.gob.mx/>
- CNA, (2000) "Situación actual de las descargas de aguas residuales en México". Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. México. <http://www.cna.gob.mx/>
- CNICP, (2000a) "El proceso de fabricación de la celulosa y del papel". Cámara Nacional de las Industrias de la Celulosa y del Papel. México. <http://www.cnicp.org.mx/>
- CNICP, (2000b) "Memoria Estadística 2000" Cámara Nacional de las Industrias de la Celulosa y del Papel. México. <http://www.cnicp.org.mx/>
- CNMA, (1999) "Norma de emisión para olores molestos (compuestos sulfuro de hidrogeno y mercaptanos: gases TRS) asociados a la fabricación de pulpa sulfatada". Comisión Nacional del Medio Ambiente. Chile. <http://www.tanswer.cl/TA/about/kraft.PDF>
- D'Arcangeli-Rojas, V. (2000) "Metodología para la estimación de emisiones contaminantes de la agricultura". Tesis para obtener el título de maestro en ingeniería ambiental, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- DEPA, (2001) "Inventory of Biocides used in Denmark" Danish Environmental Protection Agency, Environmental Project No. 585 2001.
- Environment Agency, (2000) "Technical Guidance for the Pulp and Paper Sector". Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Technical Guidance Note IPPC S6.01. November 2000. United Kingdom. graham.winter@environment-agency.gov.uk
- Environment Canada, (1993) "A Protocol for Evaluating the Quality of Trace Organic Data". Environmental Conservation Directorate, Pacific and Yukon Region. Fraser River Action Plan 1993-25.
- Environment Canada, (1997) "Fraser River Pulp Mill Effluents: Interpretation of Northwood Effluent Characterization Data. Final Report". Fraser River Action Plan, DOE FRAP 1997- 10.
- Environment Canada, (1998) "Northwood Pulp Mill - Winter 1996 Resin Acids and 1994-1996 Chlorophenolic Compounds Summary Report". Fraser River Action Plan. DOE FRAP 1997-51, March 1998. Canada.
- Environment Canada, (2000) "Developing Water Quality Guidelines for Chemicals of Concern From Pulp Mill Effluent". By Erika Szenasy. ESB Consulting, Vancouver, B.C.
- Eriksson, U.; Johnson, A. y Törnlund, M. (1995) "Risk Assessment of Slimicides". KEMI Report 9/95, Swedish National Chemicals Inspectorate, Stockholm.

- FEA, (1997) **"Direct Discharge of Effluents from the Austrian Pulp and Paper Industry (1996)"**. Federal Environment Agency, Ltd. Austria. <http://www.ubavie.gv.at/publikationen/mono/m86s.htm>
- Felton, A. (1991) **"Producción de pulpa con fibras secundarias"**. En: Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology. Casey, P. Third Edition, Vol. I, John Wiley & Sons. N. Y. United States.
- GEPA, (2000) **"Gathering and Review of Environmental Emission Scenarios for Biocides"** German Environmental Protection Agency, Berlin. Research Project Number 360 04 007. 30 June 2000.
- Godav, R. (1995) **"La protección ambiental en México"**. Estudios Sociológicos, No. 3, vol. 7, enero-abril. México.
- Greaves, H.; Jameel, J. y Joyce, T. (1995) **"Removal of chlorophenolics from an aerated lagoon"**. TAPPI Journal 78, pp 99-104.
- Greenpeace, (2000) **"Celulosa Argentina, Planta Capitán Bermúdez"**. Greenpeace Argentina. <http://greenpeace.org.ar/toxicos/celulo.pdf>
- Gullichsen, J. (1991) **"Process internal measures to reduce pulp mill pollution load"**. Water Science and Technology 24, pp 45-53.
- Henry, J. y Heinke, G. (1999) **"Ingeniería Ambiental"**. Segunda edición, Ed. Prentice Hall, pp 292-296.
- IARC, (1979) **"Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans: Some Halogenated Hydrocarbons"**. International Agency for Research on Cancer, Volume 20. World Health Organization, Lyon, 1979.
- INE, (1997) **"Manuales del programa de inventarios de emisiones de México"**. Instituto Nacional de Ecología, volúmenes II, III y IV. Elaborado por: Radian Corporation para la Asociación de Gobernadores del Oeste (Denver, Colorado) y el Comité Asesor Binacional. Estados Unidos. http://www.ine.gob.mx/dggia/cal_aire/espanol/pubsof.html
- INE, (1999) **"Primer informe nacional de emisiones y transferencias de contaminantes, 1997-1998"**. Instituto Nacional de Ecología. Registro de emisiones y transferencia de contaminantes. México. <http://www.ine.gob.mx/dggia/retc/coa/coaprinc.html>
- INE, (2000a) **"Guías para el reporte de emisiones de la industria, fabricación de celulosa y papel"**. Instituto Nacional de Ecología. México. <http://www.ine.gob.mx/dggia/retc/coa/guias.html>
- INE, (2000b) **"Programa de reporte anual COA"**. Instituto Nacional de Ecología. Cédula de operación Anual, información general. México. <http://www.ine.gob.mx/dggia/retc/coa/coaprinc.html>
- INE, (2000c) **"Registro de emisiones y transferencia de contaminantes"**. Instituto Nacional de Ecología. Información General. México. <http://www.ine.gob.mx/dggia/retc/index.html>
- INE, (2000d) **"El sector industrial y la generación de residuos, panorama de la industria en México"**. Instituto Nacional de Ecología. México. <http://www.ine.gob.mx>
- INEGI, (1997a) **"Sistema de Cuentas Nacionales de México"**. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Cálculo preliminar. <http://www.inegi.gob.mx/>

- INEGI, (1997b) **"Estadísticas del Medio Ambiente"**. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <http://dgcnesyp.inegi.gob.mx/pubcoy/estamb/gestion/gestio.html>
- INEGI, (1999) **"XV Censo Industrial"**. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Censos Económicos 1999, Industrias Manufactureras, Subsector 34: Producción de papel, productos de papel, imprentas y editoriales productos y materias primas.
- INE-SEMARNAP / UNITAR, (1997) **"Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes: Propuesta Ejecutiva Nacional"**.
- Jackson, S. y Brown, V. (1970) **"Effects of toxic wastes on treatment processes and watercourses"**. *Water Pollution Control* 69, pp 292-313.
- Johnston, J. (1995) **"Respiratory toxicity of cedar and pine wood: A review of the biomedical literature from 1986 through 1995"**. University of North Carolina at Chapel Hill.
- Johnston, P.; Stringer, L. y Stephenson, A. (1996) **"Towards Zero-Effluent Pulp and Paper Production: The Pivotal Role of Totally Chlorine Free Bleaching"**. Greenpeace Research Laboratories. Earth Resources Center, University of Exeter, UK.
- Kenneth, W. (1970) **"Handbook of Pulp and Paper Technology"**. Second edition, Van Nostrand Reinhold Company. United States.
- Kroesa, R. (1991) **"The Greenpeace Guide to Paper"**. Greenpeace International, 1991.
- Lederman, V. (2001) **"Apuntes sobre técnicas y tecnología del grabado"**. Universidad de Chile. <http://www.uchile.cl/cultura/grabadosvirtuales/apuntes/#3.2.1>.
- Lehtinen, K.; Axelsson, B.; Kringstad, K. y Strömberg, L. (1991) **"Characterization of pulp mill effluents by the model ecosystem approach"**. SSVL-investigations in the period 1982-1990. *Nordic Pulp and Paper Research Journal* 2, pp 81-88.
- Libby, E. (1979) **"Ciencia y tecnología sobre pulpa y papel"**. Tomo II: Papel. Ed. Compañía Editorial Continental. México.
- Lindström, K. y Nordin, J. (1976) **"J. Chromatogr."** En: *Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology*. Casey, P. Third Edition, Vol. I, John Wiley & Sons. N. Y. United States.
- Liss, A. (1997) **"Microbiology and biodegradation of resin acids in pulp mill effluents: a minireview"**. *Canadian Journal Microbiology* 75, pp 599-611.
- Morales, A.; Birkholz, D. y Hruday S. (1992a) **"Analysis of pulp mill effluent contaminants in water, sediment, and fish bile; fatty and resin acids"**. *Water Environment Research* Vol. 64 No. 5, pp 660-668. United States.
- Morales, A.; Birkholz, D. y Hruday S. (1992b) **"Analysis of pulp mill effluent contaminants in water, sediment, and fish bile; chlorophenols and related compounds"**. *Water Environment Research* Vol. 64 No. 5, pp 669-681. United States.

- NCASI, (1993) "Summary of data reflective of pulp and paper industry progress in reducing the TCDD/TCDF content of effluents, pulps and wastewater treatment sludges". National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement. N.Y. June 1993.
- NIEHS, (2001) "TCDD-Dioxin-Is Listed as Known Human Carcinogen in Federal Government's Ninth Report on Carcinogens". National Institute of Environmental Health Sciences, January 19, 2001. United States. <http://www.niehs.nih.gov/>
- Odriozola, V. (1997) "Impactos de la producción de papel". Campaña de tóxicos, Greenpeace Argentina. Abril 1997.
- Ortiz-Rendón, G. (1996) "Aspectos relevantes de la política del agua en México, en el marco de desarrollo sustentable". Departamento internacional del agua, Les Documents de travail. Francia. <http://www.oieau.fr/ciedd/contributions/at2/contribution/rendon.htm>
- Powell, M. (1997) "Control of Dioxins (and other organochlorines) from the Pulp and Paper Industry under the Clean Water Act and Lead in Soil at Superfund Mining Sites: Two Case Studies in EPA's Use of Science". United States Environmental Protection Agency.
- Puhakka, J.; Shieh, W.; Järvinen, K. y Melin, E. (1992) "Chloropenol degradation under oxic and anoxic conditions". Water Science Technology, Vol. 25, No. 1, pp 147-152. Great Britain.
- Rappe, C. (1990). "Dioxins, Organohalogen Compounds, 4: Dioxin' 90 EPRI-SEMINAR". Eds. O. Hutzinger and H. Fiedler, Press, FRG.
- Roberts, J. (1991) "Paper Chemistry". Blackie & Son Ltd. Bishopbriggs, Glasgow. Scotland.
- RUF, (1999) "The Pulp Pollution Primer". Reach for Unbleached Foundation. Written by Delores Broten and Jay Ritchlin. 1999 Vancouver, Canada.
- Sanjuán, R. (1997) "Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel". Universidad de Guadalajara, Departamento de Madera, Celulosa y Papel (CUCEI), México.
- Santamarta, J. (2000) "Un futuro sin cloro". World Watch. Noviembre de 2000, pp 51 55.
- SEMARNAP, (1997a) "Estadísticas del Medio Ambiente, México 1997". Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, 1995 - 1996. http://www.semarnap.gob.mx/incendios/indice_informe.htm
- SEMARNAP, (1997b) "Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)". Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
- SEMARNAP, (1997c) "Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996". Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997.
- SEMARNAP, (1999) "Estadísticas del Medio Ambiente, México 1999". Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente, 1997 - 1998. http://beta.semarnap.gob.mx/estadisticas_ambientales/compendio/presentacion/presentacion.shtml

- SEMARNAP, (2000) "Análisis temático para atender la Agenda 21". Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Dirección General de Planeación. México.
http://www.semarnap.gob.mx/dgplaneacion/agenda21/disco3_prueba.htm
- Schnell, A.; Hodson, P.; Steel, P.; Melcer, H. y Carey, J. (1997) "Chemical characterization and biotreatability of effluents from an integrated paper mill". Water Science and Technology Vol. 35 No 3, pp 7-14.
- Sirkka, S. (2001) "Environmental exposure assessment of slimicides. Revision of the emission scenario model for Finland". Finnish Environment Institute, Chemicals Division. Helsinki 2001.
- Solomon, K.; Bergman, H.; Hugget, R.; Mackay, D. y McKague, B. (1993) "A review and assessment of the ecological risks associated with the use of chlorine dioxide for the bleaching of pulp". Report prepared for the Alliance for Environmental Technology, October, 1993.
- Springer, A. (1991) "Environmental Control". En: Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology. Casey, P. Third Edition, Vol. II. John Wiley & Sons. N.Y.
- Stanley, A. (1996) "The Environmental Consequences of Pulp and Paper Manufacture". Friends of the Earth England, October 1996. Wales and Northern Ireland.
<http://www.foe.co.uk/pubsinfo/briefings/html/19971215150024.html>
- Suntio, L.; Shiu, W. y Mackay, D. (1988) "A review of the nature and properties of chemicals present in pulp mill effluents". Chemosphere 17, pp 1249-1290.
- Taylor, B.; Yeager, K.; Abernethy, S. y Westlake, G. (1988) "Scientific Criteria Document for the Development of Provincial Water Quality Objectives and Guidelines – Resin Acids". Environment Ontario.
- The Merck Index, (1996) "The Merck Index". Twelfth Edition. Published by Merck Research Laboratories, Division of Merck & Co. Inc. N. J.
- Thoms, R. (2000) "Biodegradation of Resin Acids in Pulp and Paper Mill Effluents: A Literature Review". December 7, 2000. Environmental Microbiology.
- Tripathi, C. y Allen, D. (2000) "Comparison of mesophilic and termophilic aerobic biological treatment in sequencing batch reactors treating bleached kraft pulp mill effluent". Water Resource Vol. 33 No. 3, pp 836-846.
- TÜV Latinoamérica, (1999) "Desarrollo de un RETC en la zona metropolitana de la Ciudad de México". Proyecto realizado por TÜV Latinoamérica, por encargo de la Comisión de Cooperación Ambiental.
- UAM, (1997) "De la gestión ecológica a la gestión ambiental; génesis y evolución de la política pública ambiental en México, 1970-1996". Universidad Autónoma Metropolitana. Revista Gestión y Estrategia. México. <http://www.azc.uam.mx/gestion/num11y12/doc07.htm>
- UNITAR, (1997) "Implementación del proyecto para el diseño de un RETC nacional, documento guía". United Nations Institute for Training and Research. United States.
- USEPA, (1984) "Health assessment document for chloroform". United States Environmental Protection Agency, EPA-6008-84-004A. Washington, D.C.

- USEPA, (1988) "Estimating Chemical Releases from Paper and Paperboard Production". United States Environmental Protection Agency, 560-4-88-004k. <http://www.epa.gov/>
- USEPA, (1990) "National Census of Pulp, Paper, and Paperboard Manufacturing Facilities". United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/>
- USEPA, (1993) "Development Document for Proposed Effluent Limitations Guidelines and Standards for the Pulp, Paper, and Paperboard Point Source Category". United States Environmental Protection Agency, 821-R-93-019, October 1993. <http://www.epa.gov/>
- USEPA, (1994) "Introduction to Emission Factors". United States Environmental Protection Agency, Fifth Edition of the Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42). <http://www.epa.gov/>
- USEPA, (1995) "Profile of the Pulp and Paper Industry". United States Environmental Protection Agency, 310-R-95-015, Office of Compliance Sector Notebook Project. <http://www.epa.gov/>
- USEPA, (1998) "The Inventory of Sources of Dioxin in The United States". United States Environmental Protection Agency, EPA/600/P-98/002Aa, April 1998. <http://www.epa.gov/>
- USEPA, (2000a) "Toxics Release Inventory". United States Environmental Protection Agency, National Service Center for Environmental Publications. <http://www.epa.gov/tri/whatis.htm>
- USEPA, (2000b) "Permit Guidance Document. Pulp, Paper and Paperboard Manufacturing, Point Source Category". United States Environmental Protection Agency, 40CFR§430, May 2000. <http://www.epa.gov/>
- USEPA, (2000c) "Reconocimiento y manejo de los envenenamientos por pesticidas". United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/>
- USEPA, (2000d) "Envirofacts Warehouse Chemical References". United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/safewater/dwh/c-soc/dioxin.html>
- Vizcaíno, F. (1975) "La contaminación en México". Fondo de Cultura Económica, México.
- Volk, J. (2000) "Soap Contamination In Effluent". Environmental and Lab Superintendent at Weldwood of Canada Limited - Hinton Division. Alberta, Canada.
- WRM, (2000) "El papel del sur, presentación de la pulpa y el papel". World Rainforest Movement. Capítulo 2. Uruguay. <http://www.wrm.org.uy/castellano/plantations/Material/Libropapel/capitulo2.htm>
- Yang, J. y Speece, R. (1986) "The effects of chloroform toxicity on methane fermentation". Water Resource 20, pp 1273-1279.
- Yin, C.; Renard, J. y Phillips, R. (1994) "Formation of polychlorinated phenolic compounds during high chlorine dioxide substitution bleaching, Part 2: biotreatment of combined bleach plant effluents". TAPPI journal 77, pp 158-162.
- Zender, J.; Stuthridge, T.; Langdon, A.; Wilkins, A.; Mackie, K. y McFarlane P. (1994) "Removal and transformation of resin acids during secondary treatment at a New Zealand bleached kraft pulp and paper mill". Water Science and Technology 29, pp 105-121.

Anexo 1: Lista de sustancias RETC

Lista de sustancias de la Cédula de Operación Anual (COA)					
Sustancia	Clave	Sustancia	Clave	Sustancia	Clave
Acenafteno	83-32-9	Clorodibromometano	124-48-1	Dióxido de azufre	7446-09-05
Acetaldehído	75-07-0	Cloroformo	67-66-3	Dióxido de cloro	10049-04-4
Acetamida	60-35-5	Clorometano	74-87-3	Dióxido de nitrógeno	10102-440
Ácido sulfúrico	7664-93-9	1 Cloro, 4 nitrobenzono	100-00-5	Disulfuro de Carbono	75-15-0
Acrilamida	79-06-1	Clorpirifos	2921-88-2	Endosulfán I	959-98-8
Acrilonitrilo	107-13-1	Cloruro de metileno	75-09-2	Endrín	72-20-8
Acroleína	107-02-8	Cloruro de vinilo	75-01-4	Epiclorhidrina	106-89-8
Aldrín	309-00-2	2,4 D (ácido 2,4 diclorofenoxiacético)	94-75-7	Estireno	100-42-5
Alfa-clorotolueno	100-44-7	DDT	50-29-3	Etanol	64-17-5
Alfa-hexaclorociclohexano	319-84-6	Diazinon	333-41-5	Etilbenzono	100-41-4
4 Aminobifenilo	92-67-1	1,2 Dibromo 3 cloropropano	96-12-8	Etilen tiourea	96-45-7
4 Aminoazobenceno	60-09-3	Dibromuro de etileno	106-93-4	Etilmetilcetona	78-93-3
Anilina	62-53-3	Dibutil ftalato	84-74-2	2 Etoxi-etanol	110-80-5
Aroclor 1016	12674-11-2	1,2 Diclorobenceno	95-50-1	Fenol	108-95-2
Aroclor 1242	53469-21-9	1,3 Diclorobenceno	541-73-1	Formaldehído	50-00-0
Aroclor 1260	11096-82-5	1,4 Diclorobenceno	106-46-7	Heptacloro	76-44-8
Asbesto	1332-21-4	3,3' Diclorobencidina	91-94-1	Heptacloro epóxido	1024-57-3
Benceno	71-43-2	1,4 Dicloro 2 buteno	764-41-0	Hexacloro-1,3 butadieno	87-68-3
Bencidina	92-87-5	1,2 Dicloro 3 buteno	760-23-6	Hexaclorobenceno	118-74-1
Bifenilo	92-52-4	1,2 Dicloroetano	107-06-2	Hexaclorociclopentadieno	77-47-4
Bióxido de carbono	124-38-9	1,1 Dicloroetileno	75-35-4	Hexacloroetano	67-72-1
Bis (2 cloro, 1 metil etil) éter	108-60-1	Diclorodifluorometano	75-71-8	Hexafluoruro de azufre	2551-62-4
Bis (clorometil) éter	542-88-1	2,4 Diclorofenol	120-83-2	Hidracina	302-01-2
Bis(2 cloroetil) éter	111-44-4	1,2 Dicloropropano	78-87-5	Isobutanol	78-83-1
Bis(2 etilhexil) ftalato	117-81-7	1,3 Dicloropropeno	542-75-6	Lindano	58-89-9
Boro	7440-42-8	Dieldrín	60-57-1	Malatión	121-75-5
1 Bromo, 2 cloroetano	107-04-0	1,2 Difenilhidracina	122-66-7	Manganeso	7439-96-5
Bromodiclorometano	75-27-4	2,4 Dimetilfenol	105-67-9	M-Cresol	108-39-4
Bromoformo	75-25-2	2,6 Dimetilfenol	576-26-1	Metacrilato de metilo	80-62-6
Bromometano	74-83-9	Dimetil fenol (mezcla de isómeros)	1300-71-6	Metano	74-82-8
Bromuro de vinilo	593-60-2	2,4 Dinitrofenol	51-28-5	Metil mercurio	22967-92-6
1,3 Butadieno	106-99-0	2,4 Dinitrotolueno	121-14-2	4,4' Metilen bis (2cloroanilina)	101-14-4
Butil bencil ftalato	85-68-7	2,6 Dinitrotolueno	606-20-2	4,4' Metilen bis (n,n-dimetil) anilina	101-61-1
Captán	133-06-2	Dinitrotolueno (mezcla de isómeros)	25321-14-6	Metil-isobutil-cetona	108-10-1
Clordano	57-74-9	4,6 Dinitro-o-cresol	534-52-1	2 Metilpiridina	109-06-8
Clorobenceno	108-90-7	1,4 Dioxano	123-91-1		

Lista de sustancias de la Cédula de Operación Anual (COA) (continuación)					
Sustancia	Clave	Sustancia	Clave	Sustancia	Clave
Monóxido de carbono	630-08-0	Paratión	56-38-2	Tetraóxido de osmio	20816-12-0
Naftaleno	91-20-3	Paratión metílico	298-00-0	Tiourea	62-56-6
2 Naftilamina	91-59-8	P-cresol	106-44-5	Tiram	137-26-8
N-dodecano	112-40-3	Pentaclorodibenzofurano	30402-15-4	2,4-Toluendiisocianato	584-84-9
Nitrobenzeno	98-95-3	Pentaclorodibenzo-p-dioxina	36088-22-9	Toluen diisocianatos (mezcla de isómeros)	26471-62-5
4 Nitrobifenilo	92-93-3	Pentacloroetano	76-01-7	Tolueno	108-88-3
4 Nitrofenol	100-02-7	Pentaclorofenol	87-86-5	Toxafeno (canfeno clorado técnico)	8001-35-2
2 Nitropropano	79-46-9	Piridina	110-86-1	Tri-butil-estaño	688-73-3
N-nitrosodifenilamina	86-30-6	Quinoleína	91-22-5	1,2,4- Triclorobenceno	120-82-1
N-nitrosodimetilamina	62-75-9	Silvex (ácido 2,4,5- triclorofenoxipropiónico)	93-72-1	1,1,1-Tricloroetano	71-55-6
N-nitroso-di-n- propilamina	621-64-7	Sulfuro de hidrógeno	7783-06-4	1,1,2-Tricloroetano	79-00-5
4-Nitrosomorfolina	59-89-2	2,3,7,8 Tetracloro dibenzo- p-dioxina	1746-01-6	Tricloroetileno	79-01-6
O-anisidina	90-04-0	2,3,7,8-Tetracloro dibenzo furano	51207-31-9	2,4,5-Triclorofenol	95-95-4
O-cresol	95-48-7	1,1,1,2-Tetracloroetano	630-20-6	2,4,6-Triclorofenol	88-06-2
Octacloroestireno	29082-74-4	1,1,2,2-Tetracloroetano	79-34-5	Triclorofluorometano	75-69-4
O-fenilfenol	90-43-7	1,1,2,2-Tetracloroetileno	127-18-4	Trifuralin	1582-09-8
Óxido de etileno	75-21-8	2,3,4,5-Tetraclorofenol	4901-51-3	1,2,4-Trimetilbenceno	95-63-6
Óxido de tributilestaño	56-35-9	2,3,4,6-Tetraclorofenol	58-90-2	Trióxido de azufre	7446-11-9
Óxido nítrico	10102-43-9	Tetracloruro de carbono	56-23-5	Warfarina	81-81-2
Óxido nitroso	10024-97-2	Tetraetilo de plomo	78-00-2		
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) ¹	CHP01	Compuestos de cadmio (sales inorgánicas, respirables o solubles) ³	CCM04	Compuestos de plata (sales inorgánicas solubles) ³	CCM10
Nitro-hidrocarburos aromáticos policíclicos ²	CHP02	Compuestos de cobalto (sales inorgánicas solubles) ³	CCM05	Compuestos de plomo (en todas sus formas excepto la alquilica) ³	CCM11
Hidrofluoro carbonos	CFC01	Compuestos de cobre (sales inorgánicas) ³	CCM06	Compuestos de selenio ³	CCM12
Perfluoro carbonos	CFC02	Compuestos de cromo ³	CCM07	Compuestos de uranio ³	CCM13
Compuestos de arsénico inorgánico ³	CCM01	Compuestos de mercurio (inorgánico y elemental) ³	CCM08	Compuestos de zinc (inorgánico, respirable, soluble) ³	CCM14
Compuestos de bario ³	CCM02	Compuestos de níquel (inorgánico, respirable o soluble) ³	CCM09	Compuestos de cianuro ⁴	COC01
Compuestos de berilio	CCM03				

FUENTE: INE, (2000a).