

# 72

Directores del capítulo  
*Kay Teschke y Paul Demers*

## Sumario

Perfil general <i>Kay Teschke</i> . . . . .	72.2
<hr/>	
PRINCIPALES SECTORES Y PROCESOS	
Fuentes de fibra para la fabricación de pasta y de papel <i>Anya Keefe y Kay Teschke</i> . . . . .	72.5
Manipulación de la madera <i>Anya Keefe y Kay Teschke</i> . . . . .	72.6
Elaboración de la pasta <i>Anya Keefe, George Astrakianakis y Judith Anderson</i> . . . . .	72.6
Blanqueo <i>George Astrakianakis y Judith Anderson</i> . . . . .	72.8
Fábricas de papel reciclado <i>Dick Heederik</i> . . . . .	72.9
Producción de papel y transformados: pasta papelera, papel, y cartón <i>George Astrakianakis y Judith Anderson</i> . . . . .	72.9
Generación de energía y tratamiento de las aguas <i>George Astrakianakis y Judith Anderson</i> . . . . .	72.11
Producción de productos químicos y de subproductos <i>George Astrakianakis y Judith Anderson</i> . . . . .	72.11
Riesgos profesionales y controles <i>Kay Teschke, George Astrakianakis, Judith Anderson, Anya Keefe y Dick Heederik</i> . . . . .	72.12
<hr/>	
PAUTAS DE ENFERMEDADES Y LESIONES	
Lesiones y enfermedades no malignas <i>Susan Kennedy y Kjell Torén</i> . . . . .	72.15
Cáncer <i>Kjell Torén y Kay Teschke</i> . . . . .	72.16
Cuestiones de salud pública y ambiental <i>Anya Keefe y Kay Teschke</i> . . . . .	72.19

## ● PERFIL GENERAL

Kay Teschke

### Evolución y estructura de la industria

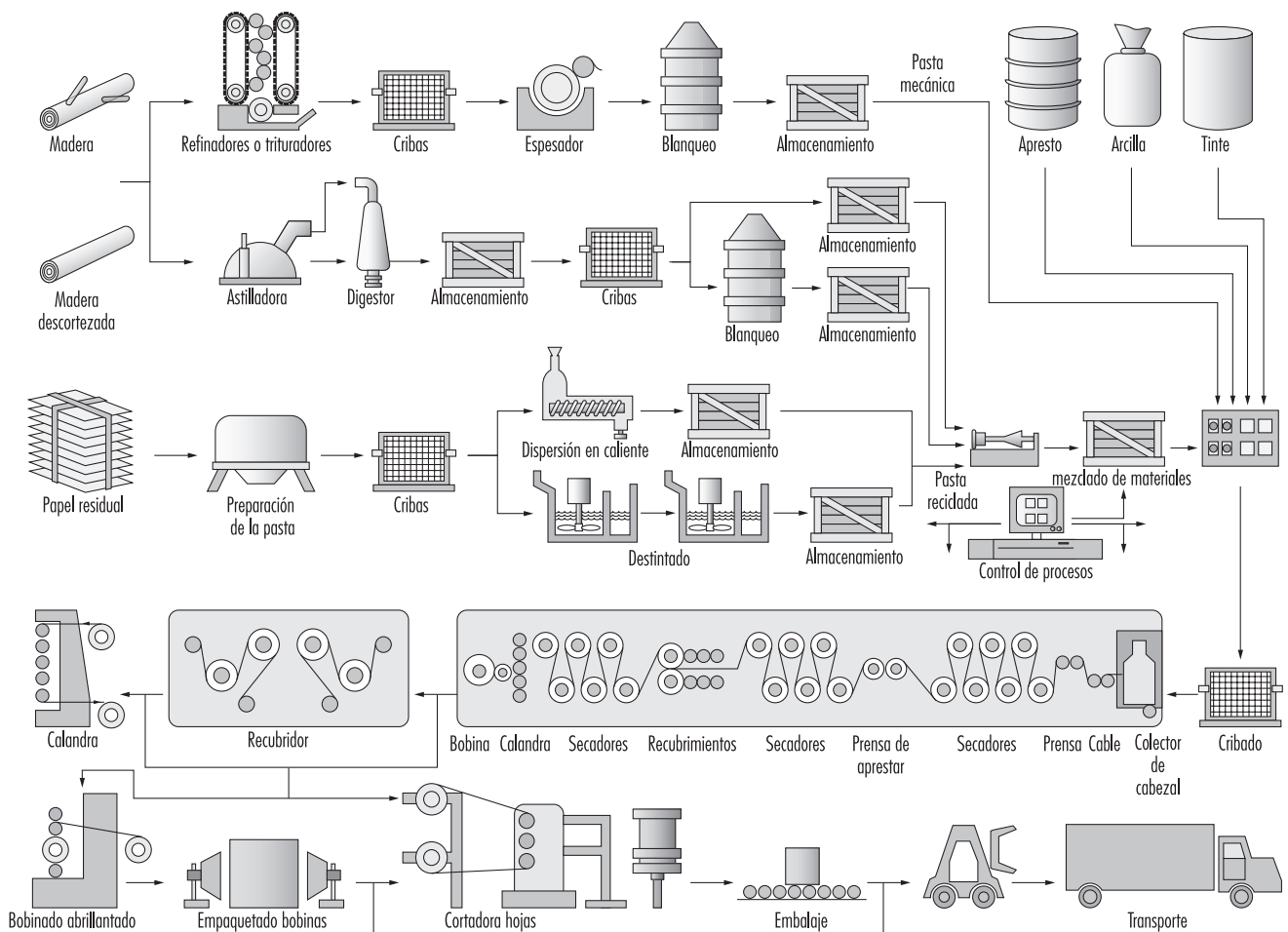
Se cree que la fabricación de papel tiene su origen en China hacia el año 100 d.C.: se utilizaban trapos, cáñamo, paja y hierba como materias primas y se golpeaban contra morteros de piedra para separar la fibra original. Aunque con el tiempo ganó terreno la mecanización, hasta el siglo XIX siguieron utilizándose los métodos de producción por lotes y las fuentes de fibra agrícolas. Las primeras máquinas continuas de papel se patentaron en los años de cambio del siglo XIX al XX. Entre 1844 y 1884 se desarrollaron los primeros métodos para la obtención de pasta de madera, una fuente de fibra más abundante que los trapos o las hierbas; estos métodos implicaban la abrasión mecánica y la aplicación de procedimientos químicos a base de sosa cáustica, sulfitos y sulfatos (Celulosa al sulfato). Con estos cambios se inició la era moderna de la fabricación de pasta y de papel.

La Figura 72.1 ilustra el procedimiento más completo de fabricación de pasta y papel de la época actual: elaboración de la mecánica de la pasta; elaboración de la química de la pasta; reciclado del papel usado; fabricación de papel, y

procesos de transformación. Hoy día, la industria se puede dividir en dos grandes sectores de acuerdo con los tipos de productos fabricados. La pasta se elabora generalmente en grandes fábricas situadas en las mismas zonas donde se recolecta la fibra (es decir, las principales regiones forestales). Muchas de estas instalaciones también fabrican papel (p. ej., papel prensa, papel de escribir, papel para imprenta o papel de seda) o cartón. La Figura 72.2 muestra el esquema de una fábrica que produce pasta blanqueada al sulfato, pasta termomecánica y papel prensa. Obsérvense los andenes y el muelle de embarque, la zona de almacenamiento de astillas, la cinta transportadora de astillas hacia el digestor, la caldera lejiadora de recuperación (edificio blanco alto) y los estanques de clarificación de los efluentes. Las distintas operaciones de transformación se realizan habitualmente cerca de los centros de consumo y utilizan papel o pasta comercial para fabricar bolsas, cartones, contenedores, papel de seda, papel de envolver, papelería decorativa, material de oficina y otros semejantes.

En los últimos años se ha acentuado la tendencia a que las empresas fabricantes de pasta y de papel pasen a formar parte de grandes compañías integradas de productos forestales. Estas compañías controlan las operaciones de recolección forestal (véase el capítulo *Silvicultura*), las serrerías (véase el capítulo *Industria de la madera*), la fabricación de pasta y de papel, y los

Figura 72.1 • Ilustración de la secuencia de procesos en las operaciones de fabricación de pasta y de papel.



Fuente: Adaptado de Weidenmüller, 1984.

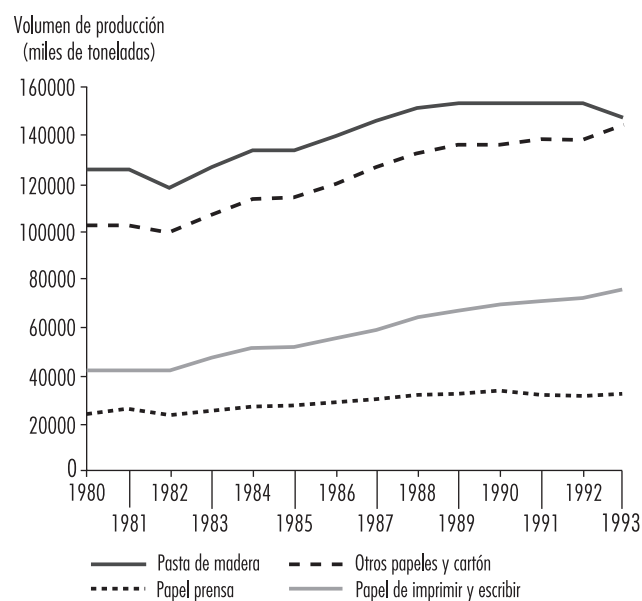
Figura 72.2 • Moderno complejo fabril de pasta y papel situado en la ribera de un río navegable.



Confor Library

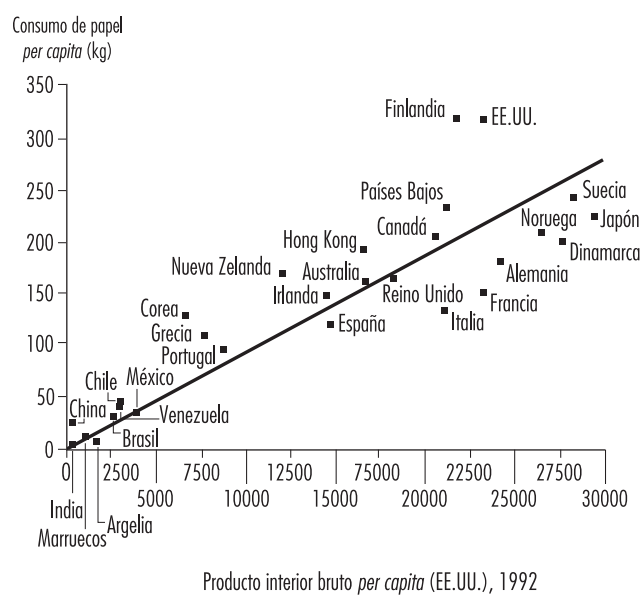
72. INDUSTRIA DEL PAPEL Y DE LA PASTA DE PAPEL

Figura 72.3 • Producción mundial de pasta y de papel, 1980 a 1993.



Fuente: Canadian Pulp and Paper Association 1995.

Figura 72.4 • Consumo de papel y cartón como indicador del desarrollo económico.



procedimientos de transformación. Una estructura así planteada les garantiza una continua fuente de fibra, una utilización eficaz de los residuos de la madera y unos compradores asegurados, todo lo cual favorece un aumento de su cuota de mercado. La integración se ha desarrollado en conjunción con la creciente concentración y mundialización, derivadas de la orientación de las empresas hacia las inversiones internacionales. La carga financiera derivada del establecimiento de plantas industriales estimula esta tendencia para permitir economías de escala. Algunas empresas han alcanzado ya niveles de producción de 10 millones de toneladas, semejantes a la capacidad total de países con la máxima producción. Muchas son multinacionales, y algunas tienen fábricas en 20 o más países de todo el mundo. Con todo, aun cuando muchas de las empresas y fábricas más pequeñas estén desapareciendo, la industria aún cuenta con centenares de miembros. A manera de ilustración, baste decir que las 150 primeras empresas suman las dos terceras partes de la producción de pasta y papel, y con solamente una tercera parte de los empleados.

### Importancia económica

La fabricación de pasta, papel y derivados del papel alcanza cifras que sitúan esta industria entre las más grandes del mundo. Hay fábricas en más de 100 países repartidos por todo el mundo, con más de 3,5 millones de personas directamente empleadas. Los mayores productores de pasta y papel son Estados Unidos, Canadá, Japón, China, Finlandia, Suecia, Alemania, Brasil y Francia (todos ellos con cifras superiores a 10 millones de toneladas en 1994; véase la Tabla 72.1).

Todos los países son consumidores. La producción mundial de pasta, papel y cartón fue de unos 400 millones de toneladas en 1993. A pesar de las predicciones de disminución del consumo de papel ante el auge de la era electrónica, desde 1980 se observa un crecimiento razonablemente constante de la tasa anual de producción del 2,5 %. (Figura 72.3). Además de sus ventajas económicas, el consumo de papel tiene el valor cultural inherente a la función que desempeña en el registro y difusión de la información. Por esta razón, la tasa de consumo de pasta y papel se ha utilizado como indicador del desarrollo socioeconómico de una nación (Figura 72.4).

La principal fuente de fibra para la producción de pasta en este siglo ha sido la madera procedente de los bosques de coníferas, aunque más recientemente ha aumentado la utilización de bosques tropicales y boreales (véase el capítulo *Industria de la madera* para tener datos sobre recolección industrial de la madera en el mundo). Como las regiones forestales tienen generalmente una baja densidad de población, tiende a producirse en el mundo una dicotomía entre las zonas de producción y las de utilización. La presión ejercida por los grupos ecologistas para la conservación de los recursos forestales, manifestada en la defensa del empleo de papel reciclado, de cultivos agrícolas y de bosques de plantación de rápida rotación como fuentes de la materia prima, puede modificar la distribución de las instalaciones de producción de pasta y papel en todo el mundo en las próximas décadas. Otras necesidades, como el incremento del consumo de papel en los países desarrollados y la globalización, también influirán en la redistribución de la industria.

### Características de la población empleada

La Tabla 72.1 indica la magnitud de la población empleada directamente en operaciones de producción de pasta y de papel y de transformación en 27 países, que en conjunto representan un 85 % del empleo en esta industria y el 90 % de las fábricas y de la producción. En países que consumen la mayor parte de lo que producen (p. ej., Estados Unidos, Alemania, Francia), por cada

Tabla 72.1 • Empleo y producción en operaciones de fabricación de pasta y de papel, en 1994, países seleccionados.\*

País	Número de trabajadores en la industria	Pasta		Papel y cartón	
		Número de fábricas	Producción (1.000 toneladas)	Número de fábricas	Producción (1.000 toneladas)
Austria	10.000	11	1.595	28	3.603
Bangladesh	15.000	7	84	17	160
Brasil	70.000	35	6.106	182	5.698
Canadá	64.000	39	24.547	117	18.316
China	1.500.000	8.000	17.054	10.000	21.354
República Checa	18.000	9	516	32	662
Finlandia	37.000	43	9.962	44	10.910
Antigua URSS**	178.000	50	3.313	161	4.826
Francia	48.000	20	2.787	146	8.678
Alemania	48.000	19	1.934	222	14.458
India	300.000	245	1.400	380	2.300
Italia	26.000	19	535	295	6.689
Japón	55.000	49	10.579	442	28.527
República de Corea	60.000	5	531	136	6.345
México	26.000	10	276	59	2.860
Pakistán	65.000	2	138	68	235
Polonia**	46.000	5	893	27	1.343
Rumania	25.000	17	202	15	288
Eslovaquia	14.000	3	304	6	422
Sudáfrica	19.000	9	2.165	20	1.684
España	20.180	21	626	141	5.528
Suecia	32.000	49	10.867	50	9.354
Taiwan	18.000	2	326	156	4.199
Tailandia	12.000	3	240	45	1.664
Turquía	12.000	11	416	34	1.102
Reino Unido	25.000	5	626	99	5.528
Estados Unidos	230.000	190	58.724	534	80.656
Total mundial	≈3.500.000	9.100	171.479	14.260	268.551

\* Se incluyen países con más de 10.000 personas empleadas en la industria.

\*\* Datos de 1989/90 (OIT 1992).

Fuente: Datos para la tabla adaptados de PPI 1995.

empleo dedicado a la producción de pasta y de papel hay dos dedicados a las operaciones de transformación.

La población empleada en la industria de la pasta y el papel trabaja fundamentalmente a tiempo completo en estructuras de gestión tradicionales, aunque algunas fábricas de Finlandia, Estados Unidos y de algún otro país han ensayado con éxito horarios de trabajo flexible y equipos de rotación de tareas autogestionados. A causa del alto coste de la inversión, muchas operaciones de la fabricación de pasta funcionan sin interrupción y requieren el trabajo por turnos; no ocurre así en las plantas de transformación. El horario laboral varía según los modelos de empleo existentes en cada país, con una gama que va de 1.500 a más de 2.000 horas al año. En 1991, los salarios anuales iban de 1.300 dólares (trabajadores no cualificados en Kenia) a 70.000 dólares (personal cualificado en los Estados Unidos) (OIT 1992). Predominan los trabajadores masculinos, ya que las mujeres representan únicamente del 10 al 20 % de la población empleada en esta industria. China e India representan los dos extremos, con un 35 % y un 5 % de mujeres, respectivamente.

Los directivos y técnicos de una fábrica de pasta de papel suelen tener titulación universitaria. En los países europeos, la mayoría de los trabajadores cualificados y muchos de los no cualificados han recibido una formación en su oficio durante varios años. En Japón es común la formación informal dentro de la propia empresa y el ascenso ulterior, planteamiento que están adoptando algunas compañías latinoamericanas y norteamericanas. En cambio, en muchas empresas de Norteamérica y de los países en desarrollo sigue siendo frecuente la formación informal en el puesto. Algunos estudios ponen de manifiesto que, en ciertas actividades, muchos trabajadores tienen problemas educativos y están escasamente preparados para el

aprendizaje permanente exigido por el entorno de esta industria, dinámico y potencialmente peligroso.

Los costes de construcción de una moderna planta de fabricación de pasta y papel son extremadamente altos (p. ej., la construcción de una fábrica de pasta kraft con 750 puestos de trabajo puede costar 1.500 millones de dólares; la de una fábrica de pasta termomecánico-química con 100 personas, 400 millones de dólares), de forma que las instalaciones de alta capacidad implican grandes economías de escala. Las plantas nuevas y modernizadas emplean generalmente procesos mecanizados y continuos, con un seguimiento electrónico y controles informatizados. Necesitan, en términos relativos, pocos empleados por unidad de producción (por ejemplo, de 1 a 1,2 horas de trabajo por tonelada de pasta en las nuevas factorías indonesias, finlandesas y chilenas). En los últimos 10 a 20 años, la producción por empleado ha aumentado, por tanto, como consecuencia de los avances tecnológicos. Los equipos más modernos permiten una más fácil conmutación entre series de productos, menores existencias en almacén y una producción garantizada en todo momento. Las mejoras de productividad se han traducido en pérdida de empleo en muchas naciones productoras del mundo desarrollado. En cambio, ha aumentado el empleo en países en desarrollo, donde se construyen nuevas factorías que, aunque con dotaciones de personal escasas, representan nuevas salidas en la industria.

Desde el decenio de 1970 al de 1990 se produjo una disminución del 10 % en la proporción de puestos de trabajo manuales en las empresas europeas y norteamericanas, de forma que estos puestos representan ahora entre el 70 y el 80 % del total (OIT 1992). Ha aumentado la utilización de la subcontratación para la construcción de fábricas, el mantenimiento y la recolección de madera; muchas empresas informan de que del 10 al 15 % de su plantilla está formada por personal subcontratado.

## PRINCIPALES SECTORES Y PROCESOS

### ● FUENTES DE FIBRA PARA LA FABRICACION DE PASTA Y DE PAPEL

*Anya Keefe y Kay Teschke*

La estructura básica de la pasta y el papel es un entramado de fibras de celulosa (un polisacárido con 600 a 1.000 unidades de sacarosa) unidas mediante enlaces de hidrógeno. Una vez separadas del resto de componentes no celulósicos, mediante el proceso de elaboración de la pasta de papel, estas fibras tienen alta resistencia a la tracción, absorben los aditivos empleados para transformar la pasta en papel y cartón, y son flexibles, químicamente estables y blancas. Esos componentes no celulósicos son, en el caso de la madera, principalmente hemicelulosas (con 15 a 90 unidades iguales de sacarosa), ligninas (altamente polimerizadas y complejas, fundamentalmente monómeros de fenil-propano; actúan como aglutinante de las fibras), extractos (grasas, ceras, alcoholes, fenoles, ácidos aromáticos, aceites esenciales, oleoresinas, esteroides, alcaloides y pigmentos colorantes), y minerales y otros compuestos inorgánicos. En la Tabla 72.2 se muestra cómo varía la proporción relativa de estos componentes según la fuente de la fibra.

La principal fuente de fibra para la fabricación de pasta y de papel es la madera de coníferas y de especies arbóreas de hoja caduca. Fuentes secundarias son la paja de trigo, el centeno y el arroz; cañas, como el bagazo; los tallos leñosos del bambú, lino y cáñamo, y fibras de semillas, hojas y cortezas, como las del algodón, el abacá y el henequén o sisal. La mayor parte de la

pasta se hace de fibra virgen, aunque la producción de papel reciclado es cada vez mayor, habiendo pasado del 20 % en 1970 al 33 % en 1991. La producción a partir de la madera supuso un 88 % de la producción mundial de pasta en 1994 (176 millones de toneladas, Figura 72.5); en consecuencia, la descripción de los procesos de elaboración de la pasta y del papel del siguiente artículo se centra en la producción basada en la madera. Los principios básicos se aplican también a otras fibras.

Tabla 72.2 • Componentes químicos de las fuentes de pasta y de papel (%).

	Maderas blandas	Maderas duras	Paja	Bambú	Algodón
Carbohidratos					
$\alpha$ -celulosa	38–46	38–49	28–42	26–43	80–85
Hemicelulosa	23–31	20–40	23–38	15–26	n.d.
Lignina	22–34	16–30	12–21	20–32	n.d.
Extraíbles	1–5	2–8	1–2	0.2–5	n.d.
Minerales y otros compuestos inorgánicos	0,1–7	0,1–11	3–20	1–10	0,8–2

n.d. = sin datos disponibles.

## ● MANIPULACION DE LA MADERA

*Anya Keefe y Kay Teschke*

La madera llega a la fábrica de pasta en forma de troncos en bruto o como astillas de una planta de cortado de tablonés. En ocasiones, la propia fábrica dispone de serrerías que producen tanto tablonés comercializables como materia para la fábrica de pulpa. No obstante, la actividad de la serrería se estudia con detalle en el capítulo *Industria de la madera*. Aquí se examinan aquellos elementos de la preparación de la madera que son específicos de una fábrica de pasta de papel.

En la zona de preparación de la madera se llevan a cabo varias tareas básicas: recepción y cubicaje de la madera al ritmo requerido por la factoría; preparación de la madera para que responda a las especificaciones de aprovisionamiento por especies, limpieza y dimensiones de la fábrica; y recogida de todos los materiales desechados en las operaciones anteriores y envío para su eliminación final. La madera se transforma en astillas o troncos adecuados para la transformación en pasta mediante una serie de pasos, entre los que figuran el descortezado, el aserrado, el astillado y el tamizado.

Los troncos se descortezan porque la corteza contiene poca fibra, presenta un alto contenido de sustancias extractivas, es oscura y con frecuencia acarrea grandes cantidades de tierra. El descortezado se puede realizar hidráulicamente, mediante chorros de agua a alta presión, o mecánicamente, rozando los troncos unos con otros o con herramientas metálicas de corte. Las descortezadoras hidráulicas se pueden utilizar en zonas costeras; sin embargo, las aguas residuales producidas no son fáciles de tratar y contribuyen a la contaminación del agua.

Los troncos descortezados pueden serrarse en segmentos pequeños (1 a 6 metros) para la obtención de pasta mecánica a la piedra, o astillarse para los métodos de refinado mecánico o químico de obtención de pasta. Las astilladoras producen astillas de una amplia gama de tamaños, pero la preparación de la pasta requiere que éstas sean de dimensiones muy específicas para asegurar un flujo constante a través de los refinadores y un nivel de reacción uniforme en los digestores. En consecuencia, las astillas se hacen pasar por una serie de cribas cuya misión consiste en clasificarlas por longitud y grosor. Las astillas

Figura 72.6 • Zona de almacenaje de astillas con alas cargadoras frontales.

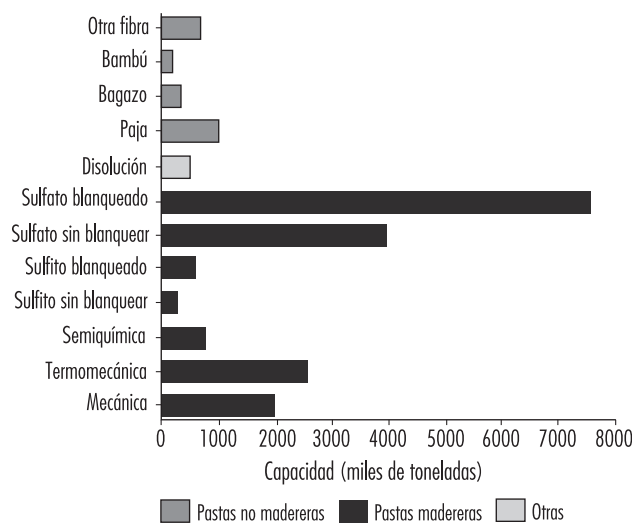


George Astrakianakis

demasiado grandes se vuelven a pasar por la astilladora, y las menores se utilizan como residuos combustibles o se vuelven a introducir en el flujo de astillas.

Los requisitos de un proceso concreto de obtención de pasta y las condiciones de las astillas determinarán la duración de las astillas almacenadas (Figura 72.6; nótese los diferentes tipos de astillas disponibles para la preparación de pasta). Dependiendo del suministro de fibra y de la demanda de la fábrica, ésta puede mantener una reserva de astillas sin tamizar para un período de 2 a 6 semanas, normalmente apiladas al aire libre. Las astillas se pueden degradar como consecuencia de reacciones de autooxidación y de hidrólisis, o de la acción de los hongos sobre los componentes de la madera. Para evitar la contaminación, los almacenamientos a corto plazo (de horas a días) se realizan en silos o arcones. Las astillas destinadas a pasta al sulfito se almacenan al aire libre durante varios meses para permitir la evaporación de los productos extractivos que pueden crear problemas en las operaciones subsiguientes. Las astillas utilizadas en fábricas de celulosa al sulfato (papel kraft), donde la trementina y el aceite resinoso se recuperan como productos comerciales, se envían directamente a la producción de pasta.

Figura 72.5 • Producción mundial de pasta, por tipos.



Fuente: FAO 1995.

## ● ELABORACION DE LA PASTA

*Anya Keefe, George Astrakianakis y Judith Anderson*

Al elaborarse la pasta, los enlaces dentro de la estructura de la madera se rompen mecánica o químicamente. Las pastas químicas se pueden producir en medio alcalino (por ejemplo, sulfato o kraft) o en medio ácido (por ejemplo, sulfito). La mayor parte de la pasta se obtiene por el procedimiento al sulfato, seguida por los métodos mecánicos (semiquímico, termomecánico y mecánico) y por el procedimiento al sulfito (Figura 72.5). Los procesos de elaboración de la pasta difieren en el rendimiento y la calidad del producto, y en los métodos químicos, en los productos químicos utilizados y en la proporción que puede recuperarse para reutilización.

### Pasta mecánica

Las pastas mecánicas se producen triturando la madera contra una piedra o entre placas metálicas, para que se separen las fibras. La acción de las máquinas rompe estas fibras de celulosa, por lo que la pasta resultante es más débil que la separada

Figura 72.7 • Depurador de pasta mecánica.



Confort library

química. La lignina que une la celulosa a la hemicelulosa no se disuelve, simplemente se ablanda, permitiendo que las fibras se asienten fuera de la estructura de la madera. El rendimiento (proporción de la madera inicial en la pasta) suele ser superior al 85 %. Algunos métodos mecánicos de formación de pasta utilizan también productos químicos (por ejemplo, las pastas quimiomecánicas); sus rendimientos son más bajos porque eliminan más cantidad de materiales no celulósicos.

En la elaboración de la pasta por raspado de la madera sobre una muela de piedra, el método mecánico más antiguo e históricamente el más usual, las fibras se extraen de trozos cortos de tronco presionados contra un cilindro rotatorio abrasivo. En la refinadora de pasta mecánica (Figura 72.7), que ganó popularidad al hacerse comercialmente viable en el decenio de 1960, se introducen astillas de madera o serrín a través del centro de un disco de la refinadora, donde se desmenuzan en trozos más pequeños al presionarlos a través de rejillas y ranuras cada vez más estrechas. (En la Figura 72.7, las refinadoras se encuentran en el centro de la fotografía y sus grandes motores están a la izquierda. Las astillas se introducen a través de las tuberías de gran diámetro y la pulpa sale por las más estrechas.) Una variante de esta técnica es la elaboración de pasta termomecánica, en la que las astillas se cuecen al vapor antes y durante el refinado, normalmente bajo presión.

Uno de los primeros métodos de producción de pasta mecano-química implica la precocción de los troncos con vapor antes de hervirlos en licores de pasta química, y su paso posterior a través de molinos con muelas de piedra para obtener pastas de "madera quimiomolida". El tratamiento moderno de pasta mecano-química emplea discos refinadores con tratamiento químico (p. ej., bisulfato sódico, hidróxido sódico), durante o después del refinado. Las pastas así producidas se denominan mecano-químicas o termomecano-químicas, según el refinado se haya producido a presión atmosférica o a alta presión. Muchas organizaciones han hecho modificaciones especializadas de estas últimas, desarrollándolas y patentándolas.

### Pasta química y recuperación

La pasta química se produce disolviendo químicamente la lignina disuelta entre las fibras de la madera, con lo cual se separan éstas sin dañarse de forma sustancial. Como en estos procesos se eliminan muchos de los componentes no fibrosos de la madera, los rendimientos son normalmente del 40 al 55 %.

El procedimiento implica la cocción de las astillas y los reactivos en solución acuosa en un reactor (digestor, Figura 72.8) que puede funcionar por lotes o de forma continua. En la cocción discontinua, el digestor se carga de astillas a través de una

abertura superior, se añaden los digestores químicos, y el contenido se cuece a temperatura y presión elevadas. Una vez se termina la cocción, se libera la presión "soplando" fuera del digestor la pasta delignificada hacia un tanque de contención. Entonces se repite la secuencia. En la digestión continua, las astillas precocidas con vapor se introducen en el digestor a un ritmo constante. Las astillas y los reactivos se mezclan en la zona de impregnación, en la parte superior del digestor, y entonces se van desplazando desde la zona superior de cocción a la inferior y a la zona de lavado, antes de soplarlas al tanque.

Hoy día, en muchas de las operaciones de preparación de pasta, los digestores químicos se recuperan. De este modo pueden reconstituirse a partir del licor de cocción empleado, y además se recupera energía calorífica quemando los componentes orgánicos de la madera disueltos. La electricidad y el vapor resultantes suministran parte, si no la totalidad, de las necesidades energéticas de la fábrica.

### Procedimiento al sulfato y recuperación

El procedimiento al sulfato produce una pasta más fuerte y oscura, y requiere la recuperación química para poder competir económicamente. Su punto de partida está en el procedimiento a la sosa (que utiliza únicamente hidróxido sódico para la digestión) y comenzó a adquirir importancia en la industria del decenio de 1930 al de 1950 con el desarrollo del blanqueo por dióxido de cloro y la implantación de procedimientos químicos de recuperación, que también producen vapor y energía para la fábrica. También desempeñó un papel importante el desarrollo de los

Figura 72.8 • Digestor continuo de kraft, con transportador de astillas en construcción.



Confort library

metales anticorrosión, como el acero inoxidable, para manejar el entorno ambiental de las fábricas de pasta ácida y de pasta alcalina.

La mezcla de cocción (licor blanco) es hidróxido sódico (NaOH) y sulfuro de sodio (Na<sub>2</sub>S). La moderna pasta kraft se transporta generalmente en digestores continuos con frecuencia revestidos de acero inoxidable (Figura 72.8). La temperatura del digestor se sube lentamente hasta unos 170 °C y se mantiene a ese nivel durante 3 ó 4 horas. La pasta (llamada “parda”, por su color) se tamiza para separar los trozos de madera que hayan quedado sin digerir, se lava para separar la mezcla de cocción utilizada (ahora licor negro) y se envía o a la nave de blanqueado o a la de la máquina de producción de pasta. La madera sin digerir se devuelve al digestor o a la caldera para quemarla y producir energía.

El licor negro recogido del digestor y el “papel pardo” de los lavaderos contienen sustancias orgánicas disueltas cuya composición química exacta depende de las características de la especie de la madera y de las condiciones de la cocción. El licor se concentra por evaporación hasta que su contenido en agua es inferior al 40 %, y se pulveriza en la caldera de recuperación. La parte orgánica se consume como combustible, generando calor que se recupera en la parte superior del horno en forma de vapor a elevada temperatura. La parte inorgánica no quemada se recoge en el fondo de la caldera como una mezcla fundida. El fundido fluye fuera del horno y se disuelve en una solución cáustica débil, obteniéndose un “licor verde” que contiene principalmente Na<sub>2</sub>S disuelto y carbonato sódico (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Este licor se bombea a una planta de recaustificación, donde se clarifica y entonces reacciona con cal apagada (Ca(OH)<sub>2</sub>), formando NaOH y carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>). El licor blanco se filtra y se almacena para su ulterior uso. El CaCO<sub>3</sub> se envía a un horno de cal, donde se calienta para regenerar cal viva (CaO).

### Procedimiento al sulfito y recuperación

El procedimiento al sulfito dominó la industria papelera desde finales del siglo XIX hasta mediados del XX, si bien estaba limitado por los tipos de madera utilizables y por la contaminación creada al eliminar el licor residual sin tratar en los cauces. Procedimientos posteriores soslayaron muchos de aquellos problemas, pero la pasta elaborada al sulfito representa actualmente tan sólo un pequeño segmento del mercado de la pasta. Aunque suele utilizarse la digestión en medio ácido, existen variantes en las que se emplean un medio neutro o un medio básico.

El licor de cocción de ácido sulfuroso (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) e ion bisulfito (HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>), se prepara *in situ*. Se quema azufre elemental para producir dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), que se hace pasar a través de una torre de absorción que contiene agua y una de las cuatro bases alcalinas (CaCO<sub>3</sub>, el sulfito original, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, hidróxido de magnesio (Mg(OH)<sub>2</sub>) o hidróxido amónico (NH<sub>4</sub>OH) que producen el ácido y el ion y controlan sus proporciones. Normalmente, la pasta al sulfito se carga en digestores discontinuos revestidos de ladrillos. Para evitar reacciones no deseadas, los digestores se calientan lentamente hasta una temperatura máxima de 130 a 140 °C, y las astillas se cuecen durante mucho tiempo (6 a 8 horas). Al aumentar la presión del digestor, el dióxido de azufre gaseoso (SO<sub>2</sub>) se purga y se vuelve a mezclar con el ácido de la cocción. Cuando quedan aproximadamente de 1 a 1,5 horas de cocción, se interrumpe la calefacción y se disminuye la presión extrayendo gas y vapor de agua. La pasta se descarga en un tanque, se lava y criba.

La mezcla usada en la digestión, llamada licor rojo, se puede utilizar para recuperar calor y productos químicos en todos los procedimientos menos en el que tiene como base bisulfito sódico. Para la pasta al sulfito amónico, el licor rojo diluido se deja primero para eliminar el SO<sub>2</sub> residual, y se concentra y se

quema. El gas que sale contiene SO<sub>2</sub> se enfría y se pasa a través de una torre de absorción en la que se combina con amoníaco para regenerar el licor de cocción. Finalmente, el licor se filtra, se refuerza con SO<sub>2</sub> y se almacena. El amoníaco no se puede recuperar porque se transforma en nitrógeno y agua en la caldera de recuperación.

En la pasta al sulfito de magnesio, al quemar el licor concentrado se obtiene óxido de magnesio (MgO) y SO<sub>2</sub>, que se recuperan fácilmente. No se produce fusión en este proceso; se recoge bastante MgO del escape de gas y se apaga con agua para producir hidróxido de magnesio (Mg(OH)<sub>2</sub>). El SO<sub>2</sub> se enfría y se combina con el Mg(OH)<sub>2</sub> en una torre de absorción para reconstituir el licor de cocción. El bisulfito de magnesio (Mg(HSO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) se refuerza con SO<sub>2</sub> y se almacena. Es posible una recuperación del 80 al 90 % de los reactivos de cocción.

La recuperación del licor de cocción de la base de sulfito sódico es más complicada. Se incinera el licor de cocción concentrado utilizado y aproximadamente el 50 % del azufre se transforma en SO<sub>2</sub>. El resto de azufre y de sodio se recoge del fondo de la caldera de recuperación como una fusión de Na<sub>2</sub>S y Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Esta se disuelve para producir licor verde, que se transforma en bisulfito sódico (NaHSO<sub>3</sub>) en varios pasos. El NaHSO<sub>3</sub> se refuerza y se almacena. El proceso de recuperación produce algunos gases sulfurados, en particular sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S).

## BLANQUEO

*George Astrakianakis y Judith Anderson*

El blanqueo es un proceso dirigido en varias etapas mediante el cual se refina y aclara la pasta en bruto. El objetivo es disolver (pasta química) o modificar (pasta mecánica) la lignina parda que no se eliminó durante los procesos de elaboración de la pasta, manteniendo la integridad de las fibras. Una fábrica produce pasta por encargo variando el orden, la concentración y el tiempo de reacción de los agentes blanqueantes.

Cada etapa del blanqueo se define por su agente blanqueante, el pH (acidez), la temperatura y la duración (Tabla 72.3). Después de cada una de ellas, la pasta se debe lavar con agentes cáusticos para eliminar los agentes blanqueadores y disolver la lignina antes de pasar a la siguiente. Finalizada la última etapa, la pasta se bombea a través de series de tamices y limpiadores para eliminar cualquier contaminante, como basura o plásticos. Entonces se concentra y transporta al almacenamiento.

Históricamente, la secuencia de blanqueo más comúnmente utilizada para producir pasta kraft blanqueada para el mercado se basaba en las cinco etapas del procedimiento CEDED (véase en la Tabla 72.3 la definición de los símbolos). Las dos primeras etapas completan el proceso de deslignificación y se consideran una prolongación de la obtención de pasta. A causa de los condicionantes ambientales referentes a las sustancias organocloradas en los vertidos de las fábricas de pasta de papel, muchas veces se sustituye el dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) por una parte de cloro (Cl<sub>2</sub>), utilizado en la primera etapa del blanqueo (C<sub>D</sub>EDED) y se utiliza un tratamiento previo con oxígeno (O<sub>2</sub>) durante la primera extracción cáustica (C<sub>D</sub>E<sub>O</sub>DED). La tendencia actual en Europa y en Norteamérica apunta a la completa sustitución del ClO<sub>2</sub> o eliminación de ambos, Cl<sub>2</sub> y ClO<sub>2</sub>. En lugar de ClO<sub>2</sub> se utiliza dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) que se añade durante la etapa final de lavado, como un “anticloro”, para detener la reacción del ClO<sub>2</sub> y controlar el pH. Se han desarrollado nuevas secuencias de blanqueo sin cloro (por ejemplo, OAZQP, OQPZP, donde Q = quelación) que



Tabla 72.3 • Agentes blanqueantes y condiciones para su empleo.

	Símbolo	Concentración del agente (%)	pH	Consistencia* (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)
Cloro (Cl <sub>2</sub> )	C	2,5–8	2	3	20–60	0,5–1,5
Hidróxido sódico (NaOH)	E	1,5–4,2	11	10–12	<80	1–2
Dióxido de cloro (ClO <sub>2</sub> )	D	≈1	0–6	10–12	60–75	2–5
Hipoclorito sódico (NaOCl)	H	1–2	9–11	10–12	30–50	0,5–3
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	O	1,2–1,9	7–8	25–33	90–130	0,3–1
Peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	P	0,25	10	12	35–80	4
Ozono (O <sub>3</sub> )	Z	0,5–3,5	2–3	35–55	20–40	<0,1
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	A	4–6	1,8–5	1,5	30–50	0,25
Ditiosulfato sódico (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	Y	1–2	5,5–8	4–8	60–65	1–2

\* Concentración de fibra en solución acuosa.

utilizan enzimas, O<sub>2</sub>, ozono(O<sub>3</sub>), peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), perácidos y agentes quelantes, como el ácido etilén-diamino tetracético (AETA). En 1993, ocho fábricas en todo el mundo habían adoptado procedimientos de blanqueo totalmente exentos de cloro. Como estos nuevos métodos eliminan las fases ácidas del blanqueo, se ha de añadir un lavado ácido para permitir la remoción de los metales enlazados a la celulosa.

Las pastas al sulfito son generalmente más fáciles de blanquear que las pastas kraft por su menor contenido de lignina. Para muchas calidades de papel se pueden utilizar diversas secuencias de blanqueo cortas (por ejemplo, CEH, DCEHD, P, HP, EPOP). Para pastas al sulfito de calidad disolvente, utilizadas en la producción de rayón, celofán y similares, hay que eliminar la lignina y la hemicelulosa, requiriéndose secuencias de blanqueo más complejas (por ejemplo, C<sub>1</sub>C<sub>2</sub>ECHDA). El lavado final ácido se realiza tanto para controlar los metales como para la acción anti-cloro. La carga de vertido para pastas al sulfito de calidad disolvente es mucho mayor porque se consume mucha madera en bruto (rendimiento típico del 50 %) y se emplea más agua.

Se denomina *abrillantado* el blanqueo de pastas mecánicas o de otras pastas de alto rendimiento, porque la operación se realiza destruyendo los grupos cromóforos sin disolver la lignina. Entre los abrillantadores están el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y/o el hidrosulfito sódico. Antes se utilizaba generalmente el hidrosulfito de zinc (ZnS<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), pero se ha eliminado por completo a causa de la toxicidad de su vertido. Antes del blanqueo, se añaden agentes quelantes para neutralizar cualquier ion metálico, aquí presentes para evitar la formación de sales coloreadas o la descomposición del peróxido de hidrógeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. La eficacia del blanqueo de la pasta mecánica depende de las especies de procedencia de la madera. Las maderas duras (por ejemplo, el álamo y el chopo) y las blandas

(por ejemplo, el abeto y el bálsamo de Judea) con más bajo contenido en lignina y en sustancias extractivas se blanquean con más alto nivel de abrillantado que las maderas más resinosas, como el pino y el cedro.

## FABRICAS DE PAPEL RECICLADO

*Dick Heederik*

El uso de residuos o de papel reciclado como materia prima para la preparación de pasta ha aumentado en el transcurso de las últimas décadas, hasta el punto de que algunas papeleras dependen casi completamente del papel de desecho. En algunos países, este último se separa del resto de los residuos domésticos, en origen, antes de su recogida. En otros se realiza una separación por clases (por ejemplo, cartón ondulado, papel prensa, papel de calidad, papel mezclado) en plantas especiales de reciclaje.

El papel reciclado se puede retransformar en pasta en un proceso relativamente suave, que utiliza agua y a veces NaOH. Los pequeños trozos de metal y de plástico se separan durante o después de la reconversión en pulpa, utilizando detritus sedimentados, ciclones o centrifugación. Las sustancias de relleno, colas y resinas se eliminan en la fase de lavado por corriente de aire a través de los lodos de la pasta, en ocasiones con la adición de agentes floculantes. La espuma contiene sustancias químicas indeseables y se retira. La pulpa se destinta empleando una serie de lavados que pueden incluir o no el uso de reactivos químicos (por ejemplo, detergentes tensioactivos) para disolver las impurezas restantes, y agentes blanqueantes que aclaran la pulpa. El blanqueo tiene la desventaja de que puede reducir la longitud de la fibra y, por consiguiente, disminuir la calidad final del papel. Los agentes blanqueantes utilizados en la producción de pasta reciclada son en general similares a los empleados en las operaciones de abrillantado de la pasta mecánica. Después de las operaciones de rebatido de la pasta y de destintado, la producción de hojas de papel continúa de una forma muy semejante a la utilizada empleando pasta de fibra virgen.

## PRODUCCION DE PAPEL Y TRANSFORMADOS: PASTA PAPELERA, PAPEL, Y CARTON

*George Astrakianakis y Judith Anderson*

Los productos finales de la fábrica de pasta y de papel dependen del proceso de preparación de la pasta, pero pueden incluir pasta papelera y varios tipos de productos de papel y cartón. Por ejemplo, la pasta mecánica, relativamente frágil, se transforma en productos de un solo uso, como papel prensa y papel de seda. La pasta kraft se transforma en productos de papel de uso múltiple, como papel de escritorio de alta calidad, libros o bolsas para comestibles. La pulpa al sulfito, que es celulosa fundamentalmente, se puede utilizar en diversos productos finales, tales como papeles especiales, rayón, película fotográfica, TNT, plásticos, adhesivos y hasta componentes para helados y dulces. Las pastas mecano-químicas son excepcionalmente consistentes, ideales para la estructura necesaria para los recipientes de cartón ondulado. Las fibras de la pasta de papel reciclado son generalmente más cortas, menos flexibles y menos permeables; por consiguiente, no pueden utilizarse en productos de papel de alta calidad. El papel reciclado se utiliza, por tanto, para fabricar

Figura 72.9 • Extremo húmedo de una máquina de papel mostrando fieltro de fibra sobre la rejilla.



George Atrakonakis

productos suaves y blandos, como el papel de seda, el papel higiénico, las toallitas y las servilletas de papel.

Para producir pasta papelera, la suspensión de pasta se tamiza una vez más y se ajusta su consistencia (4 al 10 %) antes de que esté preparada para la máquina. Entonces se extiende en una tela metálica móvil o malla de plástico (conocida como “rejilla”) en el “extremo húmedo” de la máquina de pasta, donde los operadores vigilan la velocidad de la cinta en movimiento y el contenido en agua (Figura 72.9; las prensas y la tapa del secador pueden verse en la zona superior izquierda; en las fábricas modernas, los trabajadores emplean gran parte del tiempo salas de control). El agua y el filtrado se extraen a través de la cinta eliminando la humedad de la fibra. La hoja de pasta pasa a través de una serie de rodillos rotatorios (“prensas”) que escurren el agua y el aire hasta que la consistencia es del 40 al 45 %. Se hace entonces flotar la hoja a través de una serie de pisos de secadores de aire caliente hasta que la consistencia sea del 90 al 95 %. Finalmente, la lámina continua se corta en pliegos y se apila en balas. Las balas de pasta se comprimen, se empaquetan y se empaquetan en resmas para su almacenamiento y transporte.

Aunque a primera vista parece bastante similar a la producción de hojas de pasta papelera, la fabricación de papel es bastante más compleja. Algunas papeleras emplean un surtido de diferentes pastas para optimizar la calidad del papel (p. ej., una mezcla de madera dura, madera blanda, kraft, sulfito, pasta mecánica o reciclada). Dependiendo del tipo de pasta utilizada, hay que seguir una serie de pasos para obtener la hoja de papel. Generalmente, la pasta papelera seca se rehidrata, al tiempo que se diluye la pasta de alta consistencia almacenada. Las fibras de la pasta se pueden sacudir para aumentar la zona de enlaces entre fibras para así mejorar la persistencia de la hoja. La pasta se mezcla con aditivos del “extremo húmedo” (Tabla 72.4) y se pasa a través de un conjunto final de cribas y lavaderos. Entonces la pasta queda preparada para la máquina de papel.

El esparcidor de la pasta y el cabezal distribuyen una suspensión fina (1 a 3 %) de pasta depurada, en una rejilla móvil (semejante a la de la máquina de pasta, sólo que a una velocidad mucho mayor, en ocasiones a más de 55 km/h) que forma con las fibras una fina lámina afieltrada. La lámina se desplaza a través de una serie de rodillos de prensado a la sección de secado, donde unos rodillos calentados con vapor evaporan gran parte del agua restante. En esta etapa se han desarrollado por completo los enlaces de hidrógeno entre las fibras. Finalmente, el papel se pasa por la calandria y se enrolla en bobinas. El calandrado es el proceso por el cual se alisa la superficie del papel y se reduce su espesor. El papel seco alisado así obtenido

Tabla 72.4 • Aditivos en la fabricación de papel.

Aditivo	Aplicado en	Finalidad y/o ejemplos de agentes específicos
<b>Aditivos más comúnmente utilizados</b>		
Talco	Extremo húmedo	Control de la mezcla extraíble* (evita la deposición y acumulación de la mezcla extraíble) Apresto (confiere más brillantez, más alisado, más opaco)
Dióxido de titanio	Extremo húmedo	Pigmento (hoja brillante, mejora impresión) Apresto (confiere más brillantez, más alisado, más opaco)
“Alumbre” (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	Extremo húmedo	Precipita resina al encolar sobre las fibras Ayuda a la retención (fija aditivos a las fibras, mejora la retención de las fibras de la pasta)
Resina	Extremo húmedo	Encolado interno (resistencia penetración líquidos)
Arcilla (caolín)	Húmedo/seco	Apresto (confiere más brillantez, más alisado, más opaco) Pigmento o satinado de superficie (imparte color)
Almidón	Húmedo/seco	Encolado interno (resistencia a la penetración de líquidos) Aditivo de resistencia por vía seca (aumenta la resistencia, reduce el polvo superficie) Ayuda a la retención (aditivos para encuadernación del papel, mejora la retención de la fibra de la pasta)
Tintes y pigmentos	Húmedo/seco	p. ej., tintes ácidos, básicos o directos, lacas de color, CO <sub>3</sub> Ca, puede incluir disolventes.
Latex	Extremo seco	Adhesivo (refuerza la hoja), aditivos para encuadernación del papel, tapado de poros) Impermeabilización (resistencia a la penetración de líquidos)
<b>Otros aditivos</b>		
Antimohos	Extremo seco	p. ej., tiones, tiozoles, tiocianatos, tiocarbamatos, tioles, isofiazolinonas, formaldehído, glutaraldehído, glicoles, naftol, organoclorados y organobromados, compuestos organomercúricos
Desespumadores	Extremo seco	p. ej., aceite de pino, fuel oil, aceites reciclados, sílicona, alcoholes
Agentes tratamiento de la rejilla	Extremo seco	p. ej., imidazoles, butildiglicol, acetona, trementina, ácido fosfórico
Húmedo y seco aditivos para consistencia	Extremo seco	p. ej., resinas de formaldehído, epiclorhidrina, glioxal, gomas, poliaminas, fenólicos, poli-acrilamidas, poliamidas, derivados de celulosa
Adhesivos cubrientes, y plastificantes	Extremo seco	p. ej., hidróxido de aluminio, acetato de polivinilo, acrílicos, aceite de linaza, gomas, colas proteicas, emulsiones de cera, papel metalizado, acita, glioxal, estearatos, disolventes, polietileno, derivados de celulosa, derivados del caucho, poliaminas, poliésteres, polímeros de butadieno-estireno
Otros	Húmedo/seco	Inhibidores de la corrosión, dispersantes, ignífugos, agentes antivaho, ayuda al goteo, defloculantes, agentes para control del pH, conservantes

Figura 72.10 • Extremo seco de una máquina de papel mostrando la bobina de papel y al trabajador utilizando la cizalla de aire para cortar el extremo.



George Astrakianakis.

se enrolla en una bobina, se etiqueta y se transporta al almacén (Figura 72.10; nótese el papel residual bajo la bobina y el trabajador en el panel de control abierto). Los aditivos del “extremo seco” se pueden añadir antes del calandrado sobre la máquina, o en las operaciones de preparación, “fuera de máquina”, en el sector de transformación de la industria.

En los procesos de fabricación de papel se utilizan distintos productos químicos para dar a éste características específicas en la superficie y propiedades de la hoja. Los aditivos más corrientes (Tabla 72.4) son normalmente empleados en la proporción adecuada, aunque algunos, como la arcilla o caotín y el talco, pueden aumentar hasta más del 40 % el peso en seco de algunos papeles. La Tabla 72.4 también indica la variedad de aditivos químicos que se pueden utilizar para productos y fines específicos; algunos de ellos se emplean en concentraciones muy bajas (p. ej., los bactericidas antimoho se agregan al agua de la operación en partes por millón).

El proceso de fabricación de cartón se asemeja a los de producción de pasta o de papel. Se dispersa sobre una rejilla metálica móvil una suspensión de pasta papelera y agua, se extrae el agua, y la hoja se seca y se almacena como una bobina. El procedimiento difiere en cuanto al modo en que se forma la hoja para darle grosor, en la combinación de múltiples capas y en los procesos de secado. El cartón se puede fabricar en hojas formadas por una o por varias capas, con núcleo o sin él. Generalmente, las hojas son de pasta papelera kraft (o kraft y CTMP mezcladas) de alta calidad, mientras que el núcleo se produce o con una mezcla de pasta semi-química y pasta reciclada barata, o totalmente de pasta reciclada y otros materiales de desecho. Los satinados o estucados, las cortinas de vapor y capas múltiples se añaden de acuerdo con la finalidad, para proteger el contenido del agua y de los golpes.

## ● GENERACION DE ENERGIA Y TRATAMIENTO DE LAS AGUAS

*George Astrakianakis y Judith Anderson*

Además de la recuperación del licor, las fábricas de pasta recuperan una significativa cantidad de energía quemando materiales de residuos y subproductos del proceso en calderas de vapor. Materiales tales como cortezas, residuos de madera y lodo seco,

recogidos de los sistemas de tratamiento de vertidos, se pueden quemar para proporcionar vapor a los generadores de energía eléctrica.

Las fábricas de pasta y de papel consumen grandes cantidades de agua. Una fábrica de blanqueo de pasta kraft con una producción de 1.000 toneladas al día consume más de 150 millones de litros de agua al día; una fábrica de papel aun más. Para prevenir los efectos adversos sobre la maquinaria de la fábrica y mantener la calidad del producto, el agua de entrada debe ser tratada para eliminar contaminantes, bacterias y minerales. Dependiendo de su calidad, se aplican varios tratamientos: lechos de sedimentación, filtros, floculantes, cloro o resinas de cambio iónico antes de ser usada en el proceso. El agua empleada en las calderas de vapor y de recuperación es posteriormente tratada con depuradores de oxígeno e inhibidores de la corrosión, como hidracina y morfolina, para evitar que se formen depósitos en los conductos de la caldera, reducir la corrosión de los metales y evitar el paso del agua a la turbina de vapor.

## PRODUCCION DE PRODUCTOS QUIMICOS Y DE SUBPRODUCTOS

*George Astrakianakis y Judith Anderson*

Como muchos blanqueantes químicos son reactivos y peligrosos de transportar, se producen *in situ* o en las cercanías. El dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ), el hipoclorito sódico ( $\text{NaOCl}$ ) y los perácidos se producen siempre *in situ* o en las proximidades, mientras que el cloro ( $\text{Cl}_2$ ) y el hidróxido sódico o sosa cáustica ( $\text{NaOH}$ ) se producen generalmente fuera de la factoría. El aceite de resina, un producto derivado de la resina y los ácidos grasos que se extraen durante la cocción de kraft, se puede refinar tanto dentro como fuera. La trementina, una fracción ligera como subproducto de la obtención de la pasta kraft, a menudo se recoge y se concentra *in situ*, refinándose en otra parte.

### Dióxido de cloro

El dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) es un gas amarillo verdoso extremadamente reactivo. Tóxico y corrosivo, explota en concentraciones altas (10 %) y en presencia de luz ultravioleta rápidamente se reduce a  $\text{Cl}_2$  y  $\text{O}_2$ . Se debe preparar en forma de gas diluido y almacenar como disolución diluida, lo que impide su transporte en vehículo.

El  $\text{ClO}_2$  se produce reduciendo clorato sódico ( $\text{Na}_2\text{ClO}_3$ ) con  $\text{SO}_2$ , metanol, y masal del ácido hidroclicórico. El gas que sale del reactor se condensa y se almacena como disolución acuosa al 10 %. Los generadores modernos de  $\text{ClO}_2$  operan con una eficacia del 95 % o más, y la pequeña cantidad de  $\text{Cl}_2$  que se produce se recoge o se depura del gas de salida. Dependiendo de la pureza de los productos químicos empleados, de la temperatura y de otras variables del proceso, pueden tener lugar otras reacciones secundarias. Los subproductos se reincorporan al proceso y los reactivos consumidos se neutralizan y se mandan al alcantarillado.

### Hipoclorito sódico

El hipoclorito sódico ( $\text{NaOCl}$ ) se obtiene haciendo reaccionar  $\text{Cl}_2$  con una solución diluida de  $\text{NaOH}$ . Es un proceso sencillo y automático que apenas requiere intervención. Se controla manteniendo la concentración de sosa de forma que la cantidad de  $\text{Cl}_2$  residual en el reactor sea mínima.

### Cloro y sosa cáustica

El cloro ( $\text{Cl}_2$ ), utilizado como agente blanqueante desde el principio del siglo XIX, es muy reactivo y tóxico; se trata de un gas de color verdoso que se vuelve corrosivo en presencia de humedad. Generalmente se fabrica por electrólisis de la salmuera ( $\text{NaCl}$ ), que produce  $\text{Cl}_2$  y  $\text{NaOH}$ , en instalaciones regionales, y se transporta hasta el cliente como líquido puro. Se utilizan tres métodos para la producción de  $\text{Cl}_2$  a escala industrial: la célula de mercurio, la célula de diafragma y la más reciente célula de membrana. El  $\text{Cl}_2$  se produce siempre en el ánodo. Se enfría, se purifica, se seca, se licúa y se transporta a la fábrica. Si ésta es muy grande o se encuentra a larga distancia, se pueden construir instalaciones locales, desde las que el  $\text{Cl}_2$  se puede transportar en estado gaseoso.

La calidad del  $\text{NaOH}$  depende del procedimiento que se emplee. En el más antiguo, el de la célula de mercurio, el sodio y el mercurio se combinan, formando una amalgama que se descompone con el agua. El  $\text{NaOH}$  resultante es casi puro. Uno de los inconvenientes de este método es que el mercurio contamina el lugar del trabajo y ha dado lugar a serios problemas ambientales. El  $\text{NaOH}$  producido en la célula de diafragma se extrae con los restos de salmuera y se concentra para permitir que la sal cristalice y se separe. En el diafragma se emplea amianto. El  $\text{NaOH}$  más puro se produce en las células de membrana. Una membrana semipermeable de material resinoso permite el paso de los iones sodio, sin la salmuera ni los iones cloro, y se combina con el agua añadida a la cámara catódica para formar  $\text{NaOH}$  puro. El gas hidrógeno es un subproducto de cada uno de estos procesos. Normalmente se trata y se utiliza en otros procesos o como combustible.

### Producción de aceite de resina

La producción de pasta kraft a partir de especies muy resinosas, como el pino, produce un jabón sódico de resina y ácidos grasos. El jabón se recoge de los tanques de almacenaje del licor negro y de los tanques de espumado del jabón que se encuentran localizados en el tren de evaporación del proceso de recuperación de productos químicos. El jabón refinado o el aceite de resina se utiliza como aditivo del combustible, agente de control del polvo, estabilizador de firmes de carretera, aglutinante del pavimento y material bituminoso para tejados.

En la planta del proceso, el jabón se almacena en los tanques primarios para dejar que el licor negro se asiente sobre el fondo. En un segundo tanque de almacenamiento, el jabón sube y flota. El jabón decantado y ácido sulfúrico se introducen en el reactor, se calientan hasta  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , se agitan y se dejan sedimentar. Después de sedimentar toda la noche, el aceite de resina en bruto se decanta en el recipiente de almacenamiento y se le deja reposar durante otro día. La fracción superior se considera aceite de resina crudo seco y se bombea para su almacenamiento, listo para su envío. La lignina cocida de la fracción inferior es parte del lote siguiente. El ácido sulfúrico usado se bombea al tanque de almacenamiento dejando que la lignina arrastrada se sedimente en el fondo. La lignina que queda en el reactor se concentra durante varias cocciones, se disuelve en solución de sosa cáustica al 20 % y se reenvía al primer tanque de jabón. Periódicamente, el licor negro recogido y la lignina residual de todas las procedencias se concentran y se queman como combustible.

### Recuperación de la trementina

Los gases de los digestores y los condensados de los evaporadores de licor negro se recogen para recuperar la trementina. Los gases se condensan, se combinan, y entonces se recupera la trementina, que se recondensa, se recoge y se envía al decantador. La fracción superior del decantador se extrae y se envía al almacenamiento

mientras que la fracción inferior se recicla en el recuperador. La trementina cruda se almacena separadamente del resto del sistema de recogida porque es nociva e inflamable, y se suele procesar fuera. Todos los gases no condensables se recogen y se incineran bien en las calderas de vapor, en el horno de cal o en un horno dedicado a este fin. La trementina se procesa para su empleo en alcanfor, resinas sintéticas, disolventes, agentes de flotación e insecticidas.

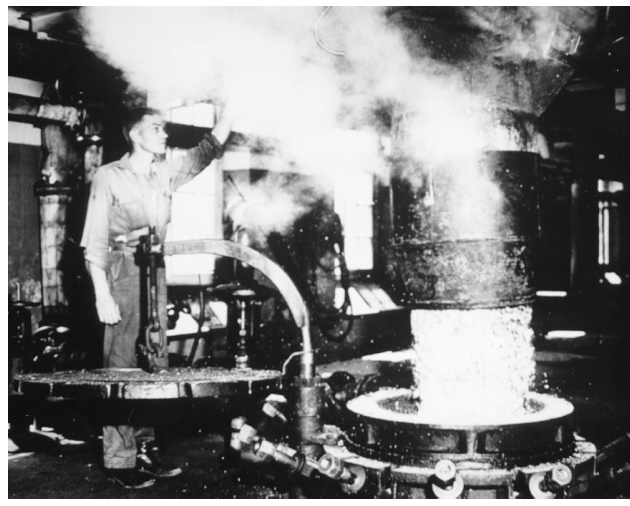
## RIESGOS PROFESIONALES Y CONTROLES

*Kay Teschke, George Astrakianakis,  
Judith Anderson, Anya Keefe y  
Dick Heederik*

La Tabla 72.5 ofrece una visión general de los tipos de riesgos que cabe esperar en cada zona de las fábricas de pasta y de papel. Aunque hay riesgos que se pueden considerar específicos de ciertos procesos de producción, los que afectan a trabajadores de las demás áreas pueden tener lugar dependiendo de las condiciones meteorológicas, la proximidad a las fuentes del riesgo, o el hecho de trabajar en más de un área de proceso (p. ej., control de calidad, servicios de personal generales, personal de mantenimiento).

La exposición a los riesgos relacionados en la Tabla 72.5 puede depender del nivel de automatización de la planta. Antes, la producción industrial de pasta y de papel era un proceso semiautomático que requería una parte importante de intervención manual. En tales instalaciones, los trabajadores permanecían en paneles situados junto a los procesos para observar el efecto de sus acciones. Las válvulas en las partes superior e inferior del digestor de cocción se abrían manualmente, y durante las etapas de llenado, los gases en el digestor podían ser desplazados por las astillas introducidas (Figura 72.11). La adición de productos químicos se establecía de acuerdo con la experiencia, en vez de medirse, y en el proceso dependían de la destreza y los conocimientos del trabajador, quien a veces es el que causaba el trastorno. Por ejemplo, la sobrecloración de la pasta puede exponer a los operarios de la zona inferior a elevados niveles de agentes blanqueantes. En las fábricas más modernas,

Figura 72.11 • Trabajador levantando la tapa del digestor discontinuo controlado manualmente.



MacMillan/Bloedel archives.

Tabla 72.5 • Riesgos potenciales de salud y seguridad en la producción de pasta y de papel, por áreas de proceso.

Área de proceso	Riesgos de seguridad	Riesgos físicos	Riesgos químicos	Riesgos biológicos
<b>Preparación de la madera</b>				
Desembarque troncos	Inmersión; equipo móvil; deslizamiento, caída	Ruido; vibración; frío; calor	Escape motores	
Sala de madera	Puntos de atrapamiento; deslizamiento, caída	Ruido; vibración	Terpenos y otros extractos de madera; polvo de madera	Bacterias; hongos
Cribado de astillas	Puntos de atrapamiento; deslizamiento, caída	Ruido; vibración	Terpenos y otros extractos de madera; polvo de madera	Bacterias; hongos
Patio de astillas	Puntos de atrapamiento; equipo móvil	Ruido; vibración; frío; calor	Escape de motores; terpenos y otros extractos de madera; polvo de madera	Bacterias; hongos
<b>Preparación de la pasta</b>				
Pasta papelera	Deslizamiento, caída	Ruido; campos eléctricos y magnéticos; elevada humedad		
REF, MQ, TMQ	Deslizamiento, caída	Ruido; campos eléctricos y magnéticos; elevada humedad	Productos químicos y subproductos de cocción; terpenos y otros extractos de madera; polvo de madera	
Pasta al sulfato	Deslizamiento, caída	Ruido; elevada humedad; calor	Ácidos y álcalis; productos químicos y subproductos de la cocción; gases de azufre reducido; terpenos y otros extractos de madera; polvo de madera	
Recuperación de sulfato	Explosiones; Puntos de atrapamiento; deslizamientos, caída	Ruido; calor; vapor	Ácidos y álcalis; amianto; cenizas; productos químicos y subproductos de la cocción; combustibles; gases de azufre reducido; dióxido de azufre	
Pasta al sulfito	Deslizamiento, caída	Ruido; elevada humedad; calor	Ácidos y álcalis; productos químicos y subproductos de la cocción; dióxido de azufre; terpenos y otros extractos de madera; polvo de madera	
Recuperación de sulfito	Explosiones; Puntos de atrapamiento; deslizamientos, caída	Ruido; calor; vapor	Ácidos y álcalis; amianto; cenizas; productos químicos y subproductos de la cocción; combustible; dióxido de azufre	
Recuperación de pasta/destintado	Deslizamiento, caída		Ácidos y álcalis; productos químicos y subproductos del blanqueo; tintes y tintas; polvo de pasta/papel; anti-moho; disolventes	Bacterias
Blanqueo	Deslizamiento, caída	Ruido; elevada humedad; calor	Productos y subproductos del blanqueo; antimohos; terpenos y otros extractos de madera	
<b>Formación de hojas y transformación</b>				
Máquina de pasta	Puntos de atrapamiento; deslizamiento, caída	Ruido; vibración; elevada humedad; calor; vapor	Ácidos y álcalis; productos químicos y subproductos del blanqueo; floculante; polvo de pasta/papel; antimohos; disolventes	Bacterias
Máquina de papel	Puntos de atrapamiento; deslizamiento, caída	Ruido; vibración; elevada humedad; calor; vapor	Ácidos y álcalis; productos químicos y subproductos del blanqueo; tintes y tintas; floculante; polvo de pasta/papel; aditivos de papel; antimohos; disolventes	Bacterias
Acabado	Puntos de atrapamiento; equipo móvil	Ruido	Ácidos y álcalis; tintes y tintas; floculante; polvo de pasta/papel; aditivos de papel; antimohos; disolventes	
Almacén	Equipo móvil		Combustibles; escape de motores; polvo de pasta/papel	
<b>Otras operaciones</b>				
Generación de energía	Puntos de atrapamiento; deslizamiento, caída	Ruido; vibración; campos eléctricos y magnéticos; calor; vapor	Amianto; cenizas; combustibles; terpenos y otros extractos de madera; polvo de madera	Bacterias; hongos
Tratamiento de aguas	Inmersión		Productos químicos y subproductos del blanqueo	Bacterias
Tratamiento de efluentes	Inmersión		Productos químicos y subproductos del blanqueo; floculante; gases de azufre reducido	Bacterias
Generación de dióxido de cloro	Explosiones; deslizamiento, caída		Productos químicos y subproductos del blanqueo	Bacterias
Recuperación trementina	Deslizamiento, caída		Productos y subproductos de la cocción; gases de azufre reducido; terpenos y otros extractos de madera	
Producción de aceite de resina			Ácidos y álcalis; productos químicos y subproductos de la cocción; gases de azufre reducido; terpenos y otros extractos de madera	

REF = refino de pasta mecánica; MQ = pasta mecano-química; TMQ = de pasta termomecano-química.

la sustitución de las válvulas y bombas controladas manualmente por otras dotadas de control electrónico permite los procesos con control remoto. La necesidad de un control de los procesos dentro de tolerancias mínimas ha requerido el empleo de la informática y de avanzadas estrategias de ingeniería. Se establecen salas de control independientes para aislar los equipos electrónicos del entorno ambiental de la producción de pasta y de papel. Consecuentemente, los operarios trabajan habitualmente en salas de control con aire acondicionado que ofrecen refugio contra el ruido, las vibraciones, la temperatura, la humedad y la exposición a los agentes químicos inherentes a las operaciones fabriles. Otros controles que han mejorado el entorno laboral se describen seguidamente.

Los riesgos vinculados a los puntos de atrapamiento, las superficies mojadas, la maquinaria en movimiento y los puntos elevados son normales en las operaciones de una fábrica de pasta y de papel. Son esenciales las defensas de las cintas transportadoras y de las partes móviles de las máquinas, la rápida limpieza de los derrames, la disponibilidad de superficies de paso que permitan un rápido drenaje y la dotación de barandillas en los pasillos adyacentes a las líneas de producción y en las alturas. Deben establecerse mecanismos de bloqueo para el mantenimiento de las cintas transportadoras de astillas y de los rodillos de las máquinas de papel y de cualquier maquinaria con partes móviles. En relación con el equipo móvil utilizado en el almacenamiento de astillas, así como en los muelles y zonas de embarque, durante el almacenamiento y en otras operaciones debe haber una protección contra vuelcos, una buena visibilidad y señales acústicas; las zonas de paso para vehículos y peatones deben estar claramente marcadas y señalizadas.

El ruido y el calor son también riesgos ubicuos. Como se ha descrito, el mayor avance técnico es el aislamiento del trabajador, normalmente posible en las zonas de preparación de la madera, de preparación de la pasta, de blanqueo y de producción de papel. También existen cabinas aisladas con aire acondicionado para el equipo móvil utilizado en el apilamiento de astillas y en otras operaciones al aire libre. Fuera de estos lugares, los trabajadores han de utilizar equipo de protección auditiva. En el trabajo en los procesos de elevadas temperaturas o en zonas al aire libre y en las operaciones de mantenimiento de reactores, los trabajadores deben tener la formación precisa para reconocer los síntomas del estrés ocasionado por el calor; en estas zonas, la planificación del trabajo debe contemplar períodos de aclimatación y de descanso. El tiempo frío provoca riesgos de congelación en tareas al aire libre, aparte de producir neblina cerca de los apilamientos de astillas, que se mantienen templadas.

En los primeros pasos de la preparación de la pasta y en las operaciones de preparación de la madera hay que contar con los riesgos vinculados a la madera, a sus extractos y a los microorganismos asociados. La prevención dependerá de cada operación concreta y puede consistir en la instalación de cabinas para los operarios, el cerramiento y ventilación de las sierras y las cintas transportadoras, y de los depósitos de astillas así como un stock bajo de astillas. El empleo de aire comprimido para eliminar el polvo de la madera propicia exposiciones considerables que deben evitarse.

Las operaciones de preparación de la pasta química dan lugar a la exposición a los productos químicos de la digestión, así como a los subproductos gaseosos del proceso de cocción, entre ellos compuestos de azufre reducido (pasta kraft) y oxidado (pasta al sulfito), y compuestos orgánicos volátiles. La formación de gases depende de determinadas condiciones de la operación: la especie de la madera utilizada; la cantidad de madera transformada en pasta; la cantidad y la concentración del licor blanco aplicado; el tiempo requerido para la formación de la pasta; y la temperatura máxima alcanzada. Además del cierre automático

de las válvulas del digestor y de las salas de control para los operarios, otras precauciones para estas zonas son la ventilación localizada de los escapes en la batería de digestores discontinuos y en los tanques de soplado, capaces de ventilar a la misma velocidad a la que los reactores liberan los gases; la aplicación de presión negativa, para evitar los escapes en las calderas de recuperación y en las torres ácidas de sulfuro-SO<sub>2</sub>, la ventilación total o parcial de los lavaderos después de la digestión; la instalación de detectores continuos con alarmas en los lugares donde pueden producirse escapes, y los planes de formación de respuesta para emergencias. Los trabajadores que recogen muestras y realizan pruebas deben tomar precauciones ante las potenciales exposiciones a los ácidos y cáusticos reaccionantes y a los vapores residuales, y ante la posibilidad de reacciones secundarias debidas a la producción de sulfuro de hidrógeno(H<sub>2</sub>S) gaseoso si el licor negro de la pasta kraft entra en contacto con los ácidos (por ejemplo, en las aguas de alcantarillado).

En las zonas de recuperación de reactivos químicos, por encima de 800 °C, puede haber productos y subproductos químicos resultantes de reacciones ácidas y básicas. Las obligaciones del puesto de trabajo pueden requerir que los trabajadores entren en contacto directo con estos agentes químicos, lo cual exige llevar la ropa de trabajo adecuada. Por ejemplo, hay que recoger la mezcla fundida que queda en la base de las calderas, y que, al salpicar entraña el consiguiente riesgo de quemaduras, térmicas y químicas. Asimismo se produce polvo cuando se añade sulfato sódico al licor negro concentrado, y cualquier fisura o abertura libera gases sulfurosos muy nocivos (y potencialmente letales). La posibilidad de una explosión de la solución acuosa siempre existe en las inmediaciones de la caldera de recuperación. Escapes de agua en las paredes de la caldera han dado lugar a muchas explosiones fatales. Los calderas de recuperación deben pararse al menor síntoma de escape, y es preciso tener previstos procedimientos para el traslado del material fundido. La carga de cal y otras sustancias cáusticas se debe hacer con transportadores cerrados y ventilados, elevadores y arcones de almacenaje.

En las plantas de blanqueo, los trabajadores están expuestos a los agentes blanqueantes y a las sustancias organocloradas y otros subproductos. Las variables del proceso, como la fuerza de los productos blanqueantes, el contenido de lignina, la temperatura y la consistencia de la pasta, se vigilan constantemente, y es preciso recoger muestras y hacer pruebas de laboratorio. A causa del peligro que encierran muchos de los agentes blanqueantes utilizados, los detectores continuos con alarma deben estar siempre dispuestos y hay que dotar de máscaras de emergencia a todos los trabajadores, que deben ensayar los procedimientos de respuesta en caso de emergencia. La instalación de campanas cerradas con salida de gases propia es una medida de control normal en la zona superior de cada torre de blanqueo y en cada fase de lavado.

La exposición a los agentes químicos en la sala de máquinas de una fábrica de pasta o de papel incluye el transporte de los productos de la planta de blanqueo, de los aditivos utilizados en la fabricación de papel y de la mezcla química a las aguas residuales. Hay polvos (celulosa, aprestos, revestimientos) y gases de escape del equipo móvil en el "extremo seco" y en las operaciones finales. La limpieza entre series sucesivas de producción debe realizarse con disolventes, ácidos y álcalis. Los controles en esta zona deben incluir el cerramiento total del área de secado de hojas, el cerramiento ventilado de las zonas donde los aditivos se descargan, pesan y mezclan; el empleo de los aditivos en solución líquida, mejor que en forma de polvo; la utilización de tintas y colorantes disueltos en agua, mejor que en disolventes, y la eliminación del uso de aire comprimido para barrer los recortes de papel y el papel de desecho.

La producción de papel en fábricas de papel reciclado produce generalmente más polvo que en las de papel convencional que utilizan pasta recién producida. La exposición a los microorganismos tiene lugar desde el comienzo (recogida y clasificación del papel) hasta el final (producción de papel) de la cadena de producción, pero, en cambio, la exposición a los agentes químicos no es tan importante.

Las fábricas de pasta y de papel emplean un numeroso personal de mantenimiento al servicio de su equipo de fabricación: carpinteros, mecánicos de instrumentos, electricistas, aisladores, maquinistas, instrumentistas, albañiles, mecánicos, reparadores de máquinas, pintores, especialistas en tuberías, mecánicos de refrigeración, estañadores, soldadores, etc. Además de las exposiciones específicas de sus tareas (véanse los capítulos *Metalurgia y metalistería* y *Guía de profesiones*), estos profesionales están expuestos a cualquiera de los peligros relacionados con las operaciones antes descritas. Como los procedimientos se han automatizado y compartimentado más, las operaciones de mantenimiento, limpieza y control de calidad se han convertido en las más expuestas. Las paradas totales de la fábrica, para limpiar los reactores y las máquinas, son tema de una gran relevancia. Dependiendo de la organización establecida, estas operaciones se llevan a cabo por el personal de mantenimiento o de producción, aunque es normal la subcontratación de personal ajeno a la fábrica, que es común que tengan menos servicios de apoyo de salud y seguridad en el trabajo.

Además de las exposiciones propias del proceso, las operaciones de las fábricas de pasta y de papel implican algunos riesgos notables para el personal de mantenimiento. Como las operaciones de producción de elaboración de la pasta, las de recuperación y de las calderas, implican la generación de un alto grado de calor, se utiliza ampliamente el amianto para aislar conducciones y reactores. El acero inoxidable es de uso común en los reactores y conducciones de las operaciones de producción de pasta, recuperación y blanqueo, extendiéndose

en algunas a la fabricación de papel. Sabido es que la soldadura de este metal genera humos de cromo y níquel.

En las paradas de mantenimiento, se aplican pulverizaciones con componentes de cromo para proteger contra la corrosión el fondo y las paredes de las calderas de recuperación durante las operaciones de arranque. A menudo se han realizado medidas de control de calidad en la línea de producción, utilizando medidores de infrarrojos y de radioisótopos. Aunque los medidores están normalmente bien protegidos, los instrumentistas que los manejan pueden estar expuestos a radiaciones.

También pueden darse ciertas exposiciones especiales entre los operarios en otras operaciones de apoyo de la fábrica. Los operarios de las calderas de vapor manejan cortezas, residuos de madera y lodos, todo ello procedente de los sistemas de tratamiento de los residuos.

En fábricas más antiguas, los operarios sacan la ceniza del fondo de las calderas y vuelven a precintarlas aplicando una mezcla de cemento y amianto alrededor de la parrilla. En las calderas modernas, este proceso está automatizado. Cuando la caldera se alimenta de material a un nivel demasiado elevado de humedad, los trabajadores están expuestos a bocanadas de productos parcialmente quemados. Los trabajadores responsables del tratamiento de aguas pueden quedar expuestos a productos químicos como el cloro, la hidracina y resinas varias. A causa de la reactividad del  $\text{ClO}_2$ , el generador de  $\text{ClO}_2$  se sitúa habitualmente en un área restringida y el operario se coloca en una sala de control remoto, desplazándose para recoger muestras y dar servicio al filtro. El clorato sódico (un oxidante fuerte) utilizado para generar  $\text{ClO}_2$  se puede volver peligrosamente inflamable si se derrama sobre cualquier material orgánico o inflamable y se seca. Cualquier vertido debe ser humedecido antes de proceder a la labor de mantenimiento, y todo el equipo debe ser limpiado a fondo con posterioridad. Las ropas mojadas deben mantenerse así, y separadas de la ropa de calle, hasta su lavado.

## PAUTAS DE ENFERMEDADES Y LESIONES

### ● LESIONES Y ENFERMEDADES NO MALIGNAS

*Susan Kennedy y Kjell Torén*

#### Lesiones

En general, en esta industria se dispone de estadísticas limitadas sobre las tasas de accidentes. En Finlandia, esta tasa fue en 1990 inferior a la media; en Canadá, las tasas de 1990 a 1994 fueron semejantes a las de otras industrias; en Estados Unidos, la tasa de 1988 fue ligeramente superior a la media; en Suecia y Alemania las tasas fueron del 25 % y del 70 % por encima de la media (OIT 1992; Worker's Compensation Board of British Columbia 1995).

Los factores de riesgo más corrientemente encontrados en accidentes graves o mortales de la industria del papel y la pasta de papel son el propio equipo de fabricación utilizado, y el tamaño y peso extremadamente elevados de las balas o bobinas de pasta y de papel. Seguía un estudio oficial realizado en Estados Unidos, en 1993, sobre accidentes de trabajo mortales desde 1979 a 1984 en fábricas de pasta, papel y cartón (Departamento de Comercio 1993), el 28 % correspondieron a operarios atrapados entre los rodillos giratorios o en otro equipo ("puntos de atrapamiento") y el 18 % a trabajadores arrollados

por objetos en caída o rodantes, especialmente balas y bobinas. Otras causas son la electrocución, la inhalación de sulfuro de hidrógeno y de otros gases tóxicos, las quemaduras masivas térmicas/químicas y, en un caso, un golpe de calor. Se observa que el número de accidentes graves relacionados con las máquinas ha disminuido con la instalación de equipo nuevo en algunos países. En el sector de transformación, el trabajo monótono y repetitivo y el empleo de equipo mecanizado, con velocidad y fuerza más elevadas, es cada vez más corriente. Aunque no se dispone de datos específicos del sector, se espera que aumentarán las tasas de lesiones por sobreesfuerzos relacionados con el trabajo repetitivo.

#### Enfermedades no malignas

Los trastornos respiratorios agudos y crónicos son los problemas sanitarios mejor documentados entre los trabajadores de las fábricas de pasta y de papel (Torén, Hagberg y Westberg 1996). La exposición a concentraciones extremadamente altas de cloro, dióxido de cloro o dióxido de azufre pueden deberse a escapes de gas o a fallos en otros procesos. En los trabajadores expuestos se desarrollan lesiones agudas de pulmón producidas por los productos químicos, con inflamación de las vías respiratorias y encharcamiento de los pulmones, que requieren hospitalización. La gravedad del daño depende de la duración y de la intensidad de la exposición y del gas implicado. Si el trabajador supera el

episodio agudo, puede recuperarse totalmente. Sin embargo, en incidentes de exposición menos intensa (también como resultado de una serie de escapes o de fugas), la exposición aguda al cloro o al dióxido de cloro puede producir el desarrollo ulterior de asma. Este asma causada por la irritación, según se ha informado en numerosos casos y en recientes estudios epidemiológicos, y tal como la evidencia actual indica, persiste muchos años después de la exposición. Trabajadores igualmente expuestos en incidentes de menor intensidad, que no han desarrollado asma, pueden sufrir de forma persistentemente irritación nasal creciente, tos, sibilancias y disminución de la capacidad pulmonar. Los trabajadores que más riesgo corren con estos incidentes de exposición son los de mantenimiento, plantas de blanqueo y construcción de las propias fábricas de pulpa. La exposición a altos niveles de dióxido de cloro causa también irritación ocular y sensación de halo alrededor de las luces.

Algunos estudios de mortalidad indican que ha aumentado el riesgo de muerte por enfermedades respiratorias entre los trabajadores de las fábricas de pasta expuestos al dióxido de azufre y al polvo de papel (Jäppinen y Tola 1990; Torén, Järholm y Morgan 1989). También se informa del aumento de los síntomas respiratorios en trabajadores de fábricas de sulfito, permanentemente expuestos a niveles bajos de dióxido de azufre (Skalpe 1964), aunque normalmente no se informa de obstrucción de las vías respiratorias entre los colectivos de trabajadores de fábricas de pasta en general. Se registran asimismo síntomas de irritación respiratoria en los trabajadores expuestos a altas concentraciones de terpenos en el aire en los procesos de recuperación de trementina, frecuentes en las fábricas de pasta. El polvo de papel blanco, según se informa, está asociado con el aumento del asma y de las enfermedades obstructivas pulmonares crónicas (Torén, Hagberg y Westberg 1996).

La exposición a los microorganismos, sobre todo en las inmediaciones de pilas de astillas de madera, descortezados y lodos prensados, aumenta el riesgo de hipersensibilidad pulmonar. Parece que la evidencia se limita a casos aislados de neumonitis por hipersensibilidad, que puede derivar en cicatrices pulmonares. La bagazosis, o neumonitis por hipersensibilidad, relacionada con la exposición a microorganismos termofílicos y al bagazo (un subproducto de la caña de azúcar), se observa todavía en fábricas que utilizan bagazo para obtener fibra.

Otros peligros respiratorios típicos de esta industria son los relacionados con humos de la soldadura del acero inoxidable y del amianto (véanse "Amianto", "Níquel" y "Cromo" y otros en esta misma *Enciclopedia*). Los trabajadores de mantenimiento son el grupo más proclive al riesgo de estas exposiciones.

Los compuestos de azufre reducido (como el sulfuro de hidrógeno, dimetil bisulfuro y mercaptanos) son fuertes irritantes oculares y pueden producir dolores de cabeza y náuseas en algunos trabajadores. Estos compuestos presentan muy bajo umbral olfativo (a niveles de parte por mil millones) para quienes no han estado expuestos previamente; en cambio, entre los trabajadores más antiguos, los umbrales olfativos son considerablemente más altos. Concentraciones del orden de 50 a 200 ppm producen fatiga olfativa e impiden percibir el característico olor a "huevos podridos". La exposición a concentraciones más altas puede producir pérdida del conocimiento, parálisis respiratoria y muerte. En las fábricas de pasta se han producido accidentes mortales relacionados con la exposición a compuestos de azufre reducido.

Se informa que la mortalidad cardiovascular ha aumentado entre los trabajadores de esta industria con indicios de una posible relación con la exposición a compuestos de azufre reducido (Jäppinen, 1987; Jäppinen y Tola, 1990). Sin embargo, otras causas de tal incremento de la mortalidad pueden ser la exposición al ruido y el trabajo por turnos, habiéndose relacionado

ambos con el aumento del riesgo de cardiopatía isquémica en otras industrias.

Entre las alteraciones cutáneas observadas en los trabajadores de las fábricas de pasta y papel figuran las quemaduras graves, químicas y térmicas, y la dermatitis de contacto (ambas irritantes y alérgicas). Los trabajadores de las fábricas de pasta kraft sufren frecuentemente quemaduras con álcalis como consecuencia del contacto con los licores calientes de la producción y con las lechadas de hidróxido cálcico del proceso de recuperación. La dermatitis de contacto es más frecuente entre los trabajadores de las fábricas de transformados de papel, porque muchos de los aditivos, desespumantes, biocidas, tintas y colas utilizados en la fabricación del papel y productos de papel son irritantes y sensibilizantes cutáneos. La dermatitis puede producirse por el contacto directo con los propios aditivos o por el manejo del papel o productos del papel recién tratados.

El ruido es un peligro significativo en la totalidad de la industria de pasta y papel. El Departamento de Trabajo de Estados Unidos estima que hay niveles de ruido superiores a 85 dBA en más del 75 % de las fábricas de papel e industrias de productos afines, en comparación con el 49 % del sector manufacturero en general, y que más del 40 % de los trabajadores están regularmente expuestos a niveles de ruido superiores a 85 dBA (Departamento de Comercio 1993). Los niveles de ruido en las inmediaciones de las máquinas de papel, astilladoras y calderas de recuperación tienden a superar sobradamente los 90 dBA. Las operaciones de transformación también tienden a generar niveles altos de ruido. El empleo de cabinas de control cerradas permite reducir la exposición cerca de las máquinas de papel. En la transformación, donde el operador ha de situarse habitualmente cerca de la máquina, se utiliza rara vez este tipo de medidas. Sin embargo, donde se han aislado las máquinas transformadoras, ha decrecido la exposición tanto al polvo del papel como al ruido.

Se observa una excesiva exposición al calor en los trabajadores adscritos a las zonas de las máquinas de papel, donde se registran temperaturas de 60 °C, aunque en la literatura científica publicada no hay estudios sobre los efectos de esta exposición al calor.

## CANCER

*Kjell Torén y Kay Teschke*

En la fabricación de pasta y de papel pueden producirse exposiciones a numerosas sustancias citadas por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) como conocidos, probables y posibles agentes cancerígenos. El amianto, del que se sabe que causa el cáncer de pulmón y el mesotelioma, se utiliza para aislar conducciones y calderas. El talco, que se utiliza ampliamente como aditivo del papel, puede estar contaminado por amianto. Otros aditivos del papel, como las colas con bencidina, formaldehído y epiclorhidrina, se consideran probables cancerígenos para el hombre. Los compuestos de cromo hexavalente y de níquel generados por la soldadura del acero inoxidable son conocidos cancerígenos pulmonares y nasales. Recientemente, la IARC ha catalogado como cancerígeno el polvo de madera, basándose fundamentalmente en la evidencia de cáncer nasal entre los trabajadores expuestos al polvo de maderas duras (IARC, 1995). Los gases de escape de los motores diesel, la hidracina, el estireno, los aceites minerales, los fenoles clorados y las dioxinas, y las radiaciones ionizantes son otros de los posibles y probables cancerígenos.

Se han realizado pocos estudios epidemiológicos específicos sobre las operaciones de fabricación de pasta y de papel, y de



ellos se desprenden pocos resultados sólidos. En la clasificación de las exposiciones utilizadas en estos estudios se emplea con frecuencia la amplia categoría industrial “pasta y papel”, y aun las clasificaciones más específicas agrupan a los trabajadores por tipos de producción de pasta o por grandes áreas industriales. Los tres estudios de cohortes que se pueden localizar en la literatura abarcan menos de 4.000 trabajadores cada uno. Están actualmente en marcha varios estudios de grandes cohortes y la IARC está coordinando un estudio multicéntrico

internacional que probablemente incluirá datos de más de 150.000 trabajadores de la pasta y el papel, y que permitirá hacer análisis con exposiciones mucho más específicas. En este artículo se revisan los conocimientos disponibles de los estudios publicados hasta la fecha. Se puede obtener información más detallada en las anteriores reseñas publicadas por la IARC (1980, 1987, y 1995) y por Torén, Persson y Wingren (1996). Los resultados de las enfermedades malignas de pulmón, estómago y hematológicas se resumen en la Tabla 72.6.

Tabla 72.6 • Resumen de los estudios sobre cáncer de pulmón, cáncer de estómago, linfoma y leucemia en trabajadores de la pasta y el papel.

Descripción del proceso	Localización del estudio	Tipo de estudio	Cáncer de pulmón	Cáncer de estómago	Linfoma LNH/EH <sup>§</sup>	Leucemia
Sulfite	Finlandia	C	0,9	1,3	X/X	X
Sulfito	USA	C	1,1	0,7	—	0,9
Sulfito	USA	C	0,8	1,5	1,3/X	0,7
Sulfito	USA	PM	0,9	2,2*	2,7*/X	1,3
Sulfato	Finlandia	C	0,9	0,9	0/0	X
Sulfato	USA	C	0,8	1,0	2,1/0	0,2
Sulfato	USA	PM	1,1	1,9	1,1/4,1*	1,7
Cloro	Finlandia	C	3,0*	—	—	—
Sulfito/papel	Suecia	CR	—	2,8*	—	—
Polvo de papel	Canadá	CR	2,0*	—	—	—
Fábricas de papel	Finlandia	C	2,0*	1,7	X/X	—
Fábricas de papel	Suecia	C	0,7*	—	—	—
Fábricas de papel	USA	C	0,8	2,0	—	2,4
Fábricas de papel	Suecia	CR	1,6	—	—	—
Fábricas de papel	USA	PM	1,3	0,9	X/1,4	1,4
Fábricas de cartón	Finlandia	C	2,2*	0,6	X/X	X
Central de energía	Finlandia	C	0,5	2,1	—	—
Mantenimiento	Finlandia	C	1,3	0,3*	1,0/X	1,5
Mantenimiento	Suecia	CR	2,1*	0,8	—	—
Pasta y papel	USA	C	0,9	1,2	0,7/X	1,8
Pasta y papel	USA	C	0,8	1,2	1,7/X	0,5
Pasta y papel	Suecia	CR	0,8	1,3	1,8	1,1
Pasta y papel	Suecia	CR	—	—	2,2/0	—
Pasta y papel	Suecia	CR	1,1	0,6	—	—
Pasta y papel	USA	CR	1,2*	—	—	—
Pasta y papel	USA	CR	1,1	—	—	—
Pasta y papel	USA	CR	—	—	—/4,0	—
Pasta y papel	Canadá	PM	—	1,2	3,8*/—	—
Pasta y papel	USA	PM	1,5*	0,5	4,4/4,5	2,3
Pasta y papel	USA	PM	0,9	1,7*	1,6/1,0	1,1
Pasta y papel	USA	PM	0,9	1,2	1,5/1,9*	1,4
Pasta y papel	USA	PM	—	1,7*	1,4	1,6*

C = estudio de cohorte, CR = estudio de casos-referencias, PM = estudio proporcionado de mortalidad. \* Estadísticamente significativo. § = Se informan por separado, LNH = linfoma de Hodgkin y EH = enfermedad de Hodgkin. X = 0 o 1 caso informado, riesgo estimado no calculado. — = No se informa sobre datos.

Un riesgo estimado superior a 1,0 indica riesgo incrementado, y un riesgo estimado por debajo de 1,0 indica riesgo disminuido.

Fuente: Adaptado de Torén, Persson y Wingren 1996.

### Cánceres del sistema respiratorio

Los trabajadores de mantenimiento de las fábricas de pasta y de papel experimentan un creciente riesgo de cáncer de pulmón y de mesotelioma maligno debido probablemente a su exposición al amianto. Un estudio sueco revela un incremento del triple del riesgo del mesotelioma de pleura entre los trabajadores de la pasta y el papel (Malker y cols. 1985). Cuando se analizaron después las exposiciones, el 71 % de los casos habían estado expuestos al amianto, la mayoría en el sector de mantenimiento de la fábrica. Se han registrado también aumentos en el riesgo de cáncer de pulmón entre los trabajadores de mantenimiento en fábricas de Suecia y de Finlandia (Torén, Sällsten y Järholm 1991; Jäppinen y cols. 1987). En el mismo estudio finlandés, se observó un incremento del doble del cáncer de pulmón entre trabajadores de fábricas de papel y de cartón. Los investigadores realizaron un estudio posterior, restringido a los trabajadores de fábricas de pasta expuestos a compuestos de cloro, y hallaron un incremento del triple del riesgo de cáncer de pulmón.

Otros pocos estudios sobre los trabajadores de la pasta y el papel han mostrado incrementos de riesgo de cáncer de pulmón. Un estudio canadiense muestra un aumento del riesgo entre los operarios expuestos al polvo de papel (Siemietycki y col. 1986), y estudios suecos y estadounidenses muestran incrementos del riesgo entre los trabajadores de las papeleras (Milham y Demers 1984; Torén, Järholm y Morgan 1989).

### Cánceres gastrointestinales

Se ha indicado un incremento del riesgo de cáncer de estómago en muchos estudios, pero sin asociarlo con ningún área concreta; por consiguiente, se desconoce cuál es la exposición más relevante. El nivel socio-económico y los hábitos dietéticos son también factores de riesgo del cáncer de estómago, y podrían confundir los resultados. Estos factores no se han tenido en cuenta en ninguno de los estudios reseñados.

La relación entre el cáncer de estómago y el trabajo en las fábricas de pasta y de papel fue señalado por primera vez en un estudio realizado en Estados Unidos en el decenio de los 1970 (Milham y Demers 1984). Se encontró que el riesgo era aún más alto, casi el doble, cuando se examinó por separado a los trabajadores ocupados en operaciones al sulfito. También aparecen los trabajadores ocupados en tareas al sulfito y de pasta papelera en un estudio posterior en el que se registró un incremento del riesgo de cáncer de estómago (Robinson, Waxweiler y Fowler 1986). Un riesgo de la misma magnitud se halló en un estudio sueco realizado entre trabajadores de las fábricas de pasta y papel de una área en la que únicamente se utilizaba el procedimiento al sulfito (Wingren y cols. 1991). Trabajadores norteamericanos de fábricas de pasta, papel y cartón de New Hampshire y del estado de Washington presentaron un incremento de la mortalidad por cáncer de estómago (Schwartz 1988; Milham 1976). Los individuos de la muestra eran probablemente una mezcla de trabajadores ocupados en fábricas al sulfito, al sulfato y papeleras. En un estudio sueco, se observó un aumento al triple de la mortalidad por cáncer de estómago en un grupo de trabajadores de fábricas al sulfito y papeleras (Wingren, Kling y Axelson 1985). La mayoría de los estudios, aunque no todos, indican una mayor incidencia del cáncer de estómago en esta industria.

Debido al pequeño número de casos considerados, muchos estudios de otros cánceres gastrointestinales no son concluyentes. Se observa un incremento del riesgo de cáncer de colon entre los trabajadores en el procedimiento al sulfato y en la producción de cartón en un estudio finlandés (Jäppinen y col., 1987), así como entre trabajadores de Estados Unidos del sector de la pasta y el papel (Solet y cols. 1989). La incidencia de cáncer de vesícula en

Suecia entre 1961 y 1979 se puso en relación con los datos profesionales del Censo Nacional de 1960 (Malker y col., 1986). Se constató un incremento de dicha incidencia entre los trabajadores masculinos de las fábricas de papel. Se han observado incrementos del riesgo de cáncer de páncreas en algunos estudios de trabajadores de fábricas de papel y al sulfito (Milham y Demers 1984; Henneberger, Ferris y Monson 1989), así como en un amplio grupo de trabajadores de la pasta y el papel (Pickle y Gottlieb, 1980; Wingren y cols. 1991). Estos hallazgos no se han verificado en otros estudios.

### Cánceres hematológicos

La cuestión de la presencia de linfomas entre los trabajadores de las fábricas de pasta y de papel fue planteada inicialmente en un estudio realizado en Estados Unidos en el decenio de 1960, en el que se halló un incremento del cuádruplo de la enfermedad de Hodgkin (Milham y Hesser 1967). En un estudio posterior, se estudió la mortalidad entre los trabajadores de las fábricas de pasta y de papel del estado de Washington entre 1950 y 1971, observándose un aumento al doble del riesgo tanto de la enfermedad de Hodgkin como de mieloma múltiple (Milham 1976). Este estudio fue seguido de otro en el que se analizó la mortalidad entre miembros de sindicatos de la pasta y el papel de Estados Unidos y Canadá (Milham y Demers, 1984). Se apreció un incremento al triple del riesgo de linfosarcoma y sarcoma reticular entre los trabajadores ocupados en operaciones al sulfito, mientras que en los trabajadores al sulfato había un riesgo cuatro veces mayor de enfermedad de Hodgkin. En un estudio de cohortes, se observó que los trabajadores al sulfato tenían un riesgo del doble de linfosarcoma y reticulosarcoma (Robinson, Waxweiler y Fowler 1986).

En muchos de los estudios en los que se pudo investigar la existencia de linfomas malignos, se observó un incremento del riesgo (Wingren y col., 1991; Persson y cols. 1993). Puesto que este incremento del riesgo sucede tanto entre los trabajadores de fábricas que utilizan el procedimiento al sulfito, como el procedimiento al sulfato, todo apunta a una fuente de exposición común. En los departamentos de clasificación y astillado, las exposiciones son bastante similares. El personal está expuesto al polvo de la madera, terpenos y otros compuestos extraíbles de la madera. Además, ambos procesos blanquean con cloro, que puede generar subproductos orgánicos clorados, incluidas pequeñas cantidades de dioxinas.

Comparados con los estudios sobre linfomas, los estudios sobre leucemias presentan pautas menos consistentes, y los riesgos estimados son menores.

### Otros cánceres

Entre los trabajadores de las fábricas de papel de Estados Unidos con presunta exposición al formaldehído, se encontraron cuatro casos de cáncer de vías urinarias, después de 30 años de estado latente, cuando solamente se esperaba uno (Robinson, Waxweiler y Fowler, 1986). Todas estas personas habían trabajado en las áreas de secado de papel de diversas papeleras.

En un estudio de casos-controles de Massachusetts, los tumores del sistema nervioso central en la infancia se relacionaron con la ocupación del padre, sin especificar, en una fábrica de pasta o de papel (Kwa y Fine 1980). Los autores consideran esta observación como un caso fortuito. Sin embargo, también se han encontrado incrementos del riesgo en tres estudios posteriores (Johnson y cols. 1987; Nasca y cols. 1988; Kuijten, Bunin y Nass 1992). En estudios de Suecia y Finlandia, se han observado incrementos de dos a tres veces del riesgo de tumores cerebrales entre los trabajadores de fábricas de pasta y de papel.

## ● CUESTIONES DE SALUD PÚBLICA Y AMBIENTAL

Anya Keefe y Kay Teschke

Como la industria del papel y la pasta de papel consume grandes cantidades de recursos naturales (p. ej., madera, agua y energía), puede ser un gran contribuyente a los problemas de contaminación del agua, del aire y del suelo, por lo que está siendo sometida a una estrecha vigilancia en los últimos años. Esta preocupación es legítima considerando la cantidad de contaminantes del agua generados por tonelada de pasta (p. ej., demanda de DBO, 55 kg de oxígeno biológico, 70 kg de sólidos en suspensión, y hasta 8 kg de compuestos organoclorados) y la cantidad total de pasta producida mundialmente (180 millones de toneladas en 1994). Además, tan sólo alrededor del 35 % del papel utilizado es reciclado, por lo que el papel residual es un contribuyente fundamental a los desperdicios sólidos mundiales (alrededor de 150 millones de un total de 500 millones de toneladas anuales).

Históricamente, el control de la contaminación no se tenía en cuenta al proyectar las fábricas de pasta y de papel. Muchos de los procesos empleados en la industria fueron desarrollados con muy poca atención para minimizar el volumen de residuos y la concentración de contaminantes. Desde el decenio de 1970, las tecnologías de reducción de la contaminación son un componente integrante del proyecto de las fábricas en Europa, Norteamérica y otras partes del mundo. La Figura 72.12 ilustra las tendencias en el período 1980 a 1994 en las fábricas canadienses en respuesta a algunos de estos aspectos ambientales: incremento del empleo de productos residuales de la madera y del papel reciclable como fuente de fibra, y disminución de la demanda de oxígeno y de compuestos organoclorados en las aguas residuales.

En este artículo se abordan los principales aspectos ambientales relacionados con los procesos de fabricación de pasta y de

papel, se identifican las fuentes de contaminación en cada proceso y se describen brevemente las tecnologías de control, incluidos los tratamientos externos y las modificaciones en la planta. Los aspectos inherentes a los residuos de la madera y a los fungicidas se tratan más detalladamente en el capítulo *Industria de la madera*.

### Cuestiones sobre la contaminación del aire

Las emisiones al aire de compuestos de azufre oxidado por las fábricas de pasta y de papel han causado daños a la vegetación, y las de compuestos de azufre reducido suscitan quejas por el olor a "huevos podridos". Estudios entre habitantes de comunidades cercanas a estas fábricas, en particular niños, han mostrado problemas respiratorios relacionados con emisiones concretas, e irritación de la mucosa y cefaleas, se cree que vinculados a los compuestos de azufre reducido. De los procesos de producción de pasta, los que potencialmente más contaminación pueden producir son los métodos químicos, en particular los de producción de pasta kraft.

Las máximas tasas de emisión de óxidos de azufre provienen de las operaciones al sulfito, especialmente las que emplean bases de calcio o de magnesio. Las mayores fuentes son los vapores de los digestores, evaporadores y la preparación del licor; las operaciones de lavado, cribado y recuperación contribuyen en menor medida. Los hornos de recuperación kraft también son una fuente de dióxido de azufre, al igual que las calderas de vapor que utilizan como combustible carbón con alto contenido de azufre o petróleo.

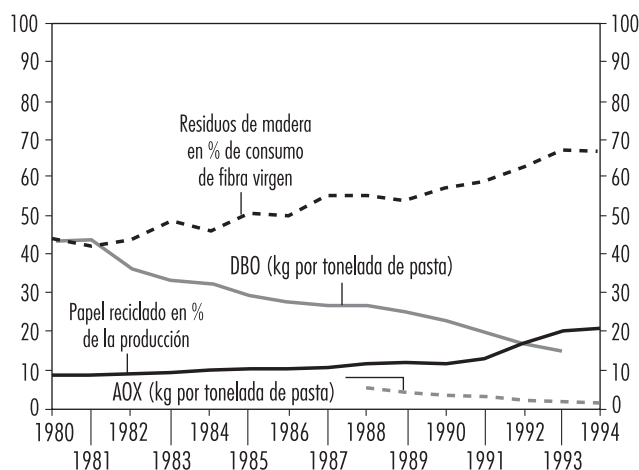
Los compuestos de azufre reducido, como el sulfuro de hidrógeno, el metil mercaptano, el dimetil sulfuro y el dimetil disulfuro, están relacionados casi exclusivamente con la producción de pasta kraft, y confieren a estas fábricas su característico olor. Las fuentes principales son el horno de recuperación, los vapores del digestor, las válvulas de seguridad del digestor y los respiraderos de los lavaderos, aunque también contribuyen los evaporadores, tanques de fundido, apagadores de cal, el horno de cal y el agua residual. Algunas operaciones al sulfito emplean ambientes reductores en sus hornos de recuperación y pueden generar problemas con el olor del azufre reducido.

La mejor manera de controlar los gases sulfurosos emitidos por la caldera de recuperación es reducir las emisiones en su origen. Los controles implican la oxidación del licor negro, la reducción del licor sulfuroso y el empleo de calderas de recuperación de bajo olor y de operaciones adecuadas del horno de recuperación. Los gases sulfurosos del vapor del digestor, de las válvulas de seguridad del digestor y de la evaporación del licor se pueden recoger e incinerar, por ejemplo, en el horno de cal. Los gases de combustión del carburante se pueden recoger utilizando lavadores de gases.

Se producen óxidos de nitrógeno como consecuencia de la combustión a altas temperaturas, y pueden producirse en cualquier fábrica con caldera de recuperación, caldera de vapor u horno de cal, dependiendo de las condiciones de la operación. La formación de óxidos de nitrógeno puede controlarse regulando la temperatura, la relación aire/combustible y el tiempo de permanencia en la zona de combustión. Otros compuestos gaseosos contribuyen menos a la contaminación de la atmósfera de la fábrica (p. ej., el monóxido de carbono de la combustión incompleta, el cloroformo de las operaciones de blanqueo, y los compuestos orgánicos volátiles de la descompresión del digestor y de la evaporación del licor).

Se producen partículas principalmente en las operaciones de combustión, aunque los tanques de disolución del fundido también pueden ser una fuente menor. Más del 50 % de las partículas de una fábrica de pasta son muy finas (menos de 1 µm de diámetro). Este fino material consta de sulfato sódico

Figura 72.12 • Indicadores ambientales en fábricas canadienses de pasta y de papel, 1980 a 1994, mostrando el uso de residuos de madera y de papel reciclado en la producción, y la demanda biológica de oxígeno (DBO) y compuestos organoclorados (AOX) en las aguas residuales efluentes.



Fuente: Canadian Pulp and Paper Association 1995.

( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) y carbonato sódico ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) de los hornos de recuperación, hornos de cal y tanques de disolución del fundido, y  $\text{NaCl}$  de la combustión de subproductos de los troncos que han estado almacenados en agua salada. Las emisiones del horno de cal incluyen una cantidad significativa de partículas gruesas debido al arrastre de sales de calcio y a la sublimación de compuestos de sodio. Las partículas gruesas pueden incluir cenizas en suspensión y productos de la combustión de sustancias orgánicas, sobre todo de las calderas de vapor. La reducción de las concentraciones de partículas puede lograrse haciendo pasar un flujo de gases a través de precipitadores electrostáticos o de lavadores de gases. Recientes innovaciones en la tecnología de las calderas de vapor incluyen un incinerador de lecho fluido que quema a muy alta temperatura, permitiendo una más eficaz conversión de la energía y la combustión de la madera residual menos uniforme.

### Cuestiones sobre la contaminación del agua

El agua residual contaminada de las fábricas de pasta y de papel puede causar la muerte de organismos acuáticos, permite la bioacumulación de compuestos tóxicos en los peces y afecta al sabor del agua potable corriente abajo. Los vertidos de las aguas residuales de pasta y papel se caracterizan, según criterios físicos, químicos o biológicos, por ser los más importantes en contenido en sólidos, demanda de oxígeno y toxicidad.

El contenido en sólidos se clasifica típicamente sobre las bases de la fracción en suspensión (no disuelta), la fracción de sólidos en suspensión que es sedimentable y las fracciones respectivas que son volátiles. La fracción sedimentable es la más nociva, porque puede formar una densa capa de cieno junto al punto de desagüe, que rápidamente reduce el oxígeno del agua recibida y permite la proliferación de bacterias anaerobias que generan metano y gases de azufre reducido. Aunque los sólidos no sedimentables generalmente se diluyen en las aguas circulantes y son, por consiguiente, de menos relevancia, pueden transportar compuestos orgánicos tóxicos para los organismos acuáticos. Los sólidos en suspensión vertidos por las fábricas de pasta y de papel contienen partículas de corteza, fibras de madera, arena, granos de los molinos de pasta mecánica, aditivos de la fabricación de papel, sedimentos del licor, subproductos de los procesos de tratamiento de aguas y células microbianas de las operaciones del tratamiento secundario.

Los derivados de la madera disueltos en los licores de la preparación de la pasta, como oligosacáridos, azúcares simples, derivados de la lignina de bajo peso molecular, ácido acético y fibras de celulosa solubilizadas, son los principales contribuyentes tanto a la demanda biológica de oxígeno (DBO) como a la demanda de oxígeno químico (DQO). Los compuestos que son tóxicos para los organismos acuáticos son los organoclorados (AOX; separación del blanqueo, especialmente de pasta kraft); ácidos de resina; ácidos grasos insaturados; alcoholes diterpénicos (especialmente del descortezado y pasta mecánica); productos de la degradación de la lignina (especiales de la pasta de sulfito); orgánicos sintéticos, como los limicidas, aceites y grasas; y productos químicos de los procesos, aditivos de la fabricación del papel y metales oxidados. Los organoclorados tienen una especial incidencia, porque son muy tóxicos para los microorganismos marinos y pueden bioacumularse. Este grupo de compuestos, como las dibenzo-*p*-dioxinas policloradas, han sido los principales motivos para disminuir al máximo el uso del cloro en el blanqueo de la pasta.

La cantidad y las fuentes de sólidos en suspensión, la demanda de oxígeno y el vertido de tóxicos dependen del proceso (Tabla 72.7). Debido a la solubilización de los extractivos de la madera con pocos o ningún producto químico y a la recuperación del ácido de resina, tanto la pasta al sulfito como la

termomecano-química producen residuos altamente tóxicos con alta DBO. Las fábricas de pasta kraft usaban más cloro para el blanqueo, y sus residuos eran más tóxicos; sin embargo, los residuos de las fábricas kraft que han eliminado el  $\text{Cl}_2$  en el blanqueo y utilizan el tratamiento secundario suelen presentar poca o ninguna toxicidad aguda, y la toxicidad sub-aguda ha sido enormemente reducida.

Los sólidos en suspensión han dejado de ser un problema porque muchas fábricas utilizan la clasificación primaria (p. ej., sedimentación por gravedad o flotación por aire disuelto), que elimina del 80 al 95 % de los sólidos sedimentables. Se utilizan tecnologías del tratamiento secundario de las aguas residuales, tales como lagunas de aireación, sistemas de lodos activados y filtración biológica, para reducir la DBO, la DQO y la presencia de organoclorados en el vertido.

Las modificaciones de los procesos en planta para reducir los sólidos sedimentables, la DQO y la toxicidad incluyen el descortezado en seco y la conducción de troncos, la mejora del cribado de astillas para permitir una cocción uniforme, la deslignificación prolongada durante la producción de pasta, la introducción de cambios en las operaciones de recuperación química de la digestión, el empleo de tecnologías alternativas de blanqueo, el lavado de la pasta de alta eficacia, la recuperación de fibra del agua de vertido y la mejora de la contención de astillas. Sin embargo, fallos en el proceso (particularmente si de ellos resulta un vertido intencionado de licores) y cambios operativos (particularmente el empleo de madera sin esperar a su total desarrollo, con alto porcentaje de extraíbles) todavía pueden causar rupturas de toxicidad periódicas.

Una estrategia relativamente reciente para la eliminación completa de la contaminación del agua es la conocida como "fábrica cerrada". Tales fábricas son una alternativa atractiva en localidades con falta de grandes fuentes de agua que actúen como suministradoras en el proceso o como caudal receptor de residuos. Se han aplicado con éxito sistemas cerrados en fábricas de pasta termomecano-química y al sulfito con base sódica. Lo que diferencia a las fábricas cerradas es que el líquido residual se evapora y el condensado se trata, filtra, y entonces se reutiliza. Otras características son las salas de cribado cerradas, el lavado en contracorriente en la planta de blanqueo, y los sistemas de control salino. Aunque este avance es eficaz para reducir al mínimo la contaminación del agua, no está claro cómo las exposiciones de los trabajadores se verán afectadas por la concentración de todas las corrientes contaminantes dentro de la fábrica. La corrosión, un aspecto fundamental a tener en

Tabla 72.7 • Total de sólidos en suspensión y DBO asociados con los efluentes no tratados, en varios procesos de la formación de pasta.

Proceso de formación de pasta	Total sólidos en suspensión (kg/t)	DBO (kg/tonelada)
Pasta papelera	50–70	10–20
Termomecánica	45–50	25–50
Termomecano-química	50–55	40–95
Kraft, sin blanquear	20–25	15–30
Kraft, blanqueada	70–85	20–50
Sulfito, bajo rendimiento	30–90	40–125
Sulfito, alto rendimiento	90–95	140–250
Destintado, no papel fino	175–180	10–80
Papel de residuos	110–115	5–15

cuenta en las fábricas que usan sistemas cerrados, y las concentraciones de bacterias y de endotoxinas aumentan en los procesos de reciclaje del agua.

### Tratamiento de sólidos

La composición de los sólidos (lodos) separados por los sistemas de tratamiento del residuo líquido varían con la fuente. Los sólidos del tratamiento primario constan principalmente de fibras de celulosa. El principal componente de los sólidos del tratamiento secundario son células microbianas. Si la fábrica emplea agentes blanqueantes clorados, los sólidos tanto primarios como secundarios contener también compuestos orgánicos clorados, un factor importante al determinar la amplitud del tratamiento requerido.

Antes de la eliminación, los lodos se espesan en unidades de sedimentación por gravedad y se secan en centrifugadoras, filtros de vacío o prensas de banda o de tornillo. Los lodos del tratamiento primario son relativamente fáciles de secar. Los del

tratamiento secundario contienen una gran cantidad de agua intracelular y en la sustancia intercelular del légame; por consiguiente, requieren la adición de floculantes químicos. Una vez suficientemente secado, el lodo se prepara para aplicaciones basadas en la tierra (p. ej., esparcido en tierra de labor o forestal, como compost o como acondicionador del suelo) o se incinera. Aunque la incineración es más costosa, y puede contribuir a los problemas de contaminación del aire, puede ser ventajosa porque destruye o reduce materiales tóxicos (p. ej., organoclorados) que podrían crear serios problemas ambientales si se filtraran en las aguas subterráneas como consecuencia de aplicaciones en la tierra.

En otras operaciones fabriles se pueden también generar residuos sólidos. Las cenizas de las calderas de vapor se pueden utilizar como lecho en la construcción de carreteras, como material de construcción y para eliminar el polvo. Residuos de los hornos de cal se utilizan para modificar la acidez del suelo y para mejorar su composición química.

### Referencias

- Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC). 1980. *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Wood, Leather and Some Associated Industries*. Vol. 25. Lyon: IARC.
- . 1987. *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Overall Evaluations of Carcinogenicity: An Updating of IARC Monographs*. Vol. 1-42 (suplemento 7). Lyon: IARC.
- . 1995. *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Wood Dust and Formaldehyde*. Vol. 62. Lyon: IARC.
- Canadian Pulp and Paper Association. 1995. *Reference Tables 1995*. Montreal, Quebec: CPPA.
- Henneberger, PK, JR Ferris, RR Monson. 1989. Mortality among pulp and paper workers in Berlin. *Br J Ind Med* 46:658-664.
- Jäppinen, P, S Tola. 1990. Cardiovascular mortality among pulp mill workers. *Br J Ind Med* 47:259-261.
- Jäppinen, P, T Hakulinen, E Pukkala, S Tola, K Kurppa. 1987. Cancer incidence of workers in the Finnish pulp and paper industry. *Scand J Work Environ Health* 13:197-202.
- Jäppinen, P. 1987. *Exposure to Compounds, Cancer Incidence and Mortality in the Finnish Pulp and Paper Industry*. Thesis, Helsingfors, Finlandia.
- Johnson, CC, JF Annegers, RF Frankowski, MR Spitz, PA Buffler. 1987. Childhood nervous system tumors—An evaluation of the association with paternal occupational exposure to hydrocarbons. *Am J Epidemiol* 126:605-613.
- Kuijten, R, GR Bunin, CC Nass. 1992. Parental occupation and childhood astrocytoma: Results of a case-control study. *Cancer Res* 52:782-786.
- Kwa, SL, IJ Fine. 1980. The association between parental occupation and childhood malignancy. *J Occup Med* 22:792-794.
- Malker, HSR, JK McLaughlin, BK Malter, NJ Stone, JA Weiner, JLE Ericsson, WJ Blot. 1985. Occupational risks for pleural mesothelioma in Sweden, 1961-1979. *J Natl Cancer Inst* 74:61-66.
- . 1986. Biliary tract cancer and occupation in Sweden. *Br J Ind Med* 43:257-262.
- Milham, SJ, J Hesser. 1967. Hodgkin's disease in woodworkers. *Lancet* 2:136-137.
- Milham, SJ, P Demers. 1984. Mortality among pulp and paper workers. *J Occup Med* 26:844-846.
- Milham, SJ. 1976. Neoplasias in the wood and pulp industry. *Ann NY Acad Sci* 271:294-300.
- Nasca, P, MS Baptiste, PA MacCubbin, BB Metzger, K Carton, P Greenwald, VW Armbrustmacher. 1988. An epidemiologic case-control study of central nervous system tumors in children and parental occupational exposures. *Am J Epidemiol* 128:1256-1265.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1995. *Pulp and Paper Capacities, Survey 1994-1999*. Roma: FAO.
- Organización Internacional del Trabajo (OIT). 1992. *Social and Labour Issues in the Pulp and Paper Industry*. Ginebra: OIT.
- Persson, B, M Fredriksson, K Olsen, B Boeryd, O Axelsson. 1993. Some occupational exposures as risk factors for malignant melanomas. *Cancer* 72:1773-1778.
- Pickle, L, M Gottlieb. 1980. Pancreatic cancer mortality in Louisiana. *Am J Public Health* 70:256-259.
- Pulp and Paper International (PPI)*. 1995. Vol. 37. Bruselas: Miller Freeman.
- Robinson, C, J Waxweiler, D Fowler. 1986. Mortality among production workers in pulp and paper mills. *Scand J Work Environ Health* 12:552-560.
- Schwartz, B. 1988. A proportionate mortality ratio analysis of pulp and paper mill workers in New Hampshire. *Br J Ind Med* 45:234-238.
- Siemiatycki, J, L Richardson, M Gérin, M Goldberg, R Dewar, M Désy, S Campell, S Wacholder. 1986. Association between several sites of cancer and nine organic dusts: Results from an hypothesis-generating case control study in Montreal, 1979-1983. *Am J Epidemiol* 123:235-249.
- Skalpe, IO. 1964. Long-term effects of sulfur dioxide exposure in pulp mills. *Br J Ind Med* 21:69-73.
- Solet, D, R Zoloth, C Sullivan, J Jewett, DM Michaels. 1989. Patterns of mortality in pulp and paper workers. *J Occup Med* 31:627-630.
- Torén, K, B Järholm, U Morgan. 1989. Mortality from asthma and chronic obstructive pulmonary diseases among workers in a soft paper mill: A case referent study. *Br J Ind Med* 46:192-195.
- Torén, K, B Persson, G Wingren. 1996. Health effects of working in pulp and paper mills: Malignant diseases. *Am J Ind Med* 29:123-130.
- Torén, K, G Sällsten, B Järholm. 1991. Mortality from asthma, chronic obstructive pulmonary disease, respiratory system cancer among paper mill workers: A case referent study. *Am J Ind Med* 19:729-737.
- Torén, K, S Hagberg, H Westberg. 1996. Health effects of working in pulp and paper mills: Exposure, obstructive airways diseases, hypersensitivity reactions, and cardiovascular diseases. *Am J Ind Med* 29:111-122.
- US Department of Commerce. 1983. *Pulp and Paper Mills*. (PB 83-115766). Washington, DC: US Department of Commerce.
- . 1993. *Selected Occupational Fatalities Related to Pulp Paper and Paperboard Mills as Found in Reports of OSHA Fatality/Catastrophe Investigations*. (PB93-213502). Washington, DC: US Department of Commerce.
- Weidenmüller, R. 1984. *Papermaking, the Art and Craft of Handmade Paper*. San Diego, California: Thorfinn International Marketing Consultants Inc.
- Wingren, G, B Persson, K Torén, O Axelsson. 1991. Mortality patterns among pulp and paper mill workers in Sweden: A case-referent study. *Am J Ind Med* 20:769-774.
- Wingren, G, H Kling, O Axelsson. 1985. Gastric cancer among paper mill workers. *J Occup Med* 27:715.
- Workers' Compensation Board of British Columbia. 1995. Comunicación personal.

### Otras lecturas recomendadas

- Bascom, R, P Rafoord. 1994. Upper airways disorders. En *Textbook of Clinical Occupational and Environmental Medicine*, dirigido por L Rosenstock y MR Cullen. Filadelfia: WB Saunders Co.
- Bernhart, S. 1994. Irritant bronchitis. En *Textbook of Clinical Occupational and Environmental Medicine*, dirigido por L Rosenstock y MR Cullen. Filadelfia: WB Saunders Co.
- Chan-Yeung, M, J Malo. 1995. Forestry products. En *Occupational and Environmental Respiratory Disease*, dirigido por P Harber, MB Schenker y JR Balmes. St. Louis: Mosby-Yearbook Inc.
- Naciones Unidas. 1995. *Statistical Yearbook, 1993*. Nueva York: NU.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1994. *1993 Yearbook of Forest Products*. Roma: FAO.
- Rix, BA, E Lyng. 1996. Industrial hygiene measurements in a new industry: The repulping and deinking of paper waste. *Am J Ind Med* 30:142-147.
- Schwartz, DA. 1994. Acute inhalational injury. En *Textbook of Clinical Occupational and Environmental Medicine*, dirigido por L Rosenstock y MR Cullen. Filadelfia: WB Saunders Co.
- Smook, GA. 1989. *Handbook for Pulp and Paper Technologists*. Atlanta, GA: Technical Association for the Pulp and Paper Industry.
- Springer, AM. 1986. *Industrial Environmental Control Pulp and Paper Industry*. Nueva York: John Wiley and Sons.

