UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE SALINO PROVENIENTE DE UNA PAPELERA, MEDIANTE UN SISTEMA DE EVAPORACION DE TRIPLE EFECTO

Por

ARMANDO LUIS VILLARREAL RODRIGUEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS con Especialidad en
Ingeniería Ambiental

Enero 2004

TM
Z6834
.C5
FIC
2004
.V5

1020149816

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE SALINO PROVENIENTE DE UNA PAPELERA, MEDIANTE UN SISTEMA DE EVAPORACION DE TRIPLE EFECTO

Por

ARMANDO LUIS VILLARREAL RODRIGUEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS con Especialidad e
Ingeniería Ambiental

Enero 2004

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE SALINO PROVENIENTE DE UNA PAPELERA, MEDIANTE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE TRIPLE EFECTO

Por

ARMANDO LUIS VILLARREAL RODRÍGUEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Especialidad en
Ingeniería Ambiental

Enero, 2004

CAPILLA ALFONSINA
FONDO
TESIS

TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE SALINO PROVENIENTE DE UNA PAPELERA, MEDIANTE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE TRIPLE EFECTO

Aprobación de la Tesis:

Asesor de la Tesis

Dr. Juan Manuel Barbarín Castillo

Subdirector de Estudios de Postgrado

M. I. Justino César González Álvarez

M. I. JUSTINO CÉSAR GONZÁLEZ ÁLVAREZ
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL,
U. A. N. L.

Presente.-

Estimado M. I. González Álvarez:

Por este conducto me permito manifestarle que he revisado y dictamino como **APROBADA** la Tesis de mi asesorado el **Ing. Armando Luis Villarreal Rodríguez** , titulada **"Tratamiento de un Efluente Salino Proveniente de una Papelera Mediante un Sistema de Evaporación de Triple Efecto"**.

Esta Tesis forma parte de los requisitos para optar al grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental que otorga la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ingeniería Civil.

De acuerdo con el Protocolo Oficial para la Aprobación de Tesis de Maestría, anexo a la presente encontrará Ud. el original y dos copias de la Tesis mencionada, para que sea turnada al Comité correspondiente para su evaluación.

Agradeciendo las atenciones que tenga a la presente, quedo de Ud. con un cordial saludo.

Monterrey, N.L. a 25 de junio de 2003

A T E N T A M E N T E

DR. JUAN MANUEL BARBARÍN CASTILLO
DIRECTOR DE TESIS

15 de agosto de 2003

ING. JUSTINO CÉSAR GONZÁLEZ ÁLVAREZ, M EN I
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
Presente.-

Estimado M en I González Álvarez:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado Evaluador de la Tesis: **"TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE SALINO PROVENIENTE DE UNA INDUSTRIA PAPELERA MEDIANTE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE TRIPLE EFECTO"**, que presenta el Sr. Ing. Armando Luis Villarreal Rodríguez, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, le manifiesto mi disposición para cualquier duda o aclaración que considere usted pertinente,

Atentamente,

MC Jimmy Luis Loaiza Navía

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

COMPROBANTE DE CORRECCIÓN

Tesista: ARMANDO LUIS VILLARREAL RODRÍGUEZ

Tema de la tesis: TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE SALINO PROVENIENTE DE UNA PAPELERA, MEDIANTE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE TRIPLE EFECTO.

Este documento certifica la corrección DEFINITIVA **del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.**

Recomendaciones adicionales:
(NINGUNA)

Nombre y firma de quien corrigió:
Arq. Ramón Longoria Ramírez

M.I. JUSTINO CÉSAR GONZÁLEZ ALVAREZ
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Ciudad Universitaria, a 10 de diciembre de 2003

Cd. Universitaria,
San Nicolás de los Garza,
Nuevo León, México.
☎ Fax (01) 8376 3970 • 8352 4969 Ext. 202

Educación para la vida

Ing. Alejandro Ramírez Alcázar. Ph.D.
Taxco 265, Col. Regina
Monterrey, N. L.
Tel. 83 51 68 22

02 de Enero de 2004.

Facultad de Ingeniería Civil, U. A. N. L.
Subdirección de Estudios de Posgrado.
C. U., San Nicolás de los Garza, N. L:

At´n.: Ing. Justino C. González Álvarez. M. en I.
Subdirector de Estudios de Posgrado.

Después de saludarle, atentamente acuso recibo de una copia de la Tesis que presenta el Ing. Armando Luis Villarreal Rodríguez, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental, para la que se me ha distinguido como evaluador, y que se intitula "Tratamiento de un efluente salino proveniente de una papelera, mediante un sistema de evaporación de triple efecto".

El tema relacionado es interesante y de actualidad, dado que muchas empresas se enfrentan al problema del tratamiento y la disposición de los efluentes salinos provenientes de distintas operaciones y procesos de fabricación.

La tesis presenta información interesante para una aplicación en particular, e incluye estudios de tratabilidad y selección de equipo para el tratamiento del efluente salino, y en mi opinión es satisfactoria para el fin que el Ing. Villarreal la presenta.

El Ing. Villarreal ya efectuó las aclaraciones solicitadas en nuestro oficio de fecha 01/08/03, por lo que en mi opinión el escrito ya actualizado puede emplearse para el objeto citado en el primer párrafo de ésta oficio.

Sin otro asunto en particular por el momento, quedo de Ud., en espera de las noticias relacionadas con la realización de las etapas siguientes tendientes a la obtención del Grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental, del Ing. Villarreal Rodríguez

Monterrey, N. L.

Atentamente:

Dr. Alejandro Ramírez Alcázar
Profr. de la División de Estudios de Postrgado de la FIC. UANL

AGRADECIMIENTOS

GRACIAS a Dios por darme el milagro de la vida; por enseñarme cada día que la vida puede ser maravillosa y por tantos otros dones que me ha dado; gracias.

A mis padres por confiar en mi; Papá, se que allá donde estás guías mis pasos e iluminas mi camino, aun en los momentos más oscuros; gracias.

A todos y cuantos forman parte de mi familia, gracias.

Al Dr. Juan Manuel Barbarín Castillo por su confianza y apoyo y, además, por tantos meses de trabajo que hoy se ve culminado; gracias.

Y muy especialmente a ti, mi compañera, mi esposa; porque debido a tu confianza y a tu apoyo incondicional, hoy me es posible dar este paso; gracias.

Especialmente a ti Alma Rosa

RESUMEN

I.Q. ARMANDO LUIS VILLARREAL RODRÍGUEZ ENERO DE 2004
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TÍTULO: TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE SALINO PROVENIENTE DE UNA PAPELERA, MEDIANTE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE TRIPLE EFECTO

No. De páginas: 173

Candidato al Grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental

Estudio: Operaciones Unitarias en Ingeniería Ambiental

Propósito y Método de Estudio: El propósito principal de este trabajo fue lograr concentrar una agua residual con características de salmuera, mediante una operación de evaporación, que permitiese obtener sales cristalizadas y agua re-utilizable. Con el tratamiento propuesto se puede también dar una solución al problema ambiental de manejo y disposición de ese tipo de agua residual. El método de estudio fue experimental y en base al conocimiento de los principios que aplican a las operaciones unitarias de transferencia de masa y energía entre fases. Con ello se logró establecer que, para el agua a tratar, la evaporación requería de tres fases de equilibrio (triple efecto) y, en consecuencia, las condiciones optimas de operación de cada una fueron establecidas como base para el cálculo de tamaño y demás parámetros de los evaporadores e intercambiadores de calor, así como del cristalizador de sales.

Contribuciones y Conclusiones: Las operaciones de evaporación y cristalización, desarrolladas sobre un agua residual con características de salmuera, permitieron brindar un método alternativo viable para este tipo de desecho común en la industria. El tratamiento permitió concentrar la salmuera desde 1100 hasta 1330 gL^{-1} y obtener así 32,808 kg de sal por día y 150,000 L de agua por día. La comercialización de las sales y el reuso del agua tratada garantizan que el proceso propuesto no genera desechos y de esta manera es sustentable.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo **Página**

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 El Agua en Relación con el Desarrollo de la Humanidad 1
1.1.1 El agua como receptor de contaminantes. 4
1.1.2 Ciclo natural del agua 5
1.1.3 Ciclo hidrológico modificado por la actividad humana 7
1.1.4 Uso industrial del agua 9
1.1.5 Purificación del agua 12
1.2 Legislación Ambiental Aplicable 14
1.2.1 Reglamentos vigentes 17
1.2.2 Normas Oficiales Mexicanas 21
1.3 Criterios de Calidad del Agua 26
1.3.1 Contenido de sales solubles 29
1.3.2 Índices para evaluar el agua destinada al uso agrícola 30
1.3.2.1 Degradación del suelo . . . 32
1.3.3 Índices para evaluar el agua destinada a la ganadería 36
1.3.4 Valores máximos permisibles de substancias tóxicas en el agua . . . 39
1.4 Parámetros Indicadores de la Calidad del Agua. 41
1.4.1 El potencial de hidrógeno. 42
1.4.2 La conductividad 43
1.4.3 La alcalinidad total 43
1.4.4 El oxígeno disuelto. 44
1.4.5 La demanda bioquímica de oxígeno . . 45
1.4.6 La demanda química de oxígeno . . . 45
1.4.7 los sólidos en todas sus formas . . 46
1.4.8 Las grasas y aceites 47

Capítulo **Página**

1.4.9 El fósforo 47
1.4.10 El nitrógeno 47
1.4.11 Los detergentes 48
1.4.12 La dureza. 48
1.5 Panorama Actual 49

2. GENERACIÓN DE SALMUERA EN LA INDUSTRIA DEL PAPEL RECICLADO 53

2.1 Introducción 53
2.2 Necesidad de Tratar la Salmuera por Razones Legales y Económicas 56
2.2.1 Razones legales 56
2.2.2 Razones económicas 58
2.2.3 Usos de la sal 58
2.2.4 Principales sistemas de producción de sal en México 60
2.3 Objetivos del Trabajo 62
2.3.1 Alcance del trabajo 63
2.4 Volumen de Salmuera de este Caso Práctico . 64
2.4.1 Bases de diseño 64
2.5 Proceso Propuesto 65
2.5.1 Breve descripción de los experimentos en el laboratorio 68
2.6 Resumen de los Objetivos del Trabajo . . . 69
2.7 Justificación del Proceso Propuesto . . . 70

3. TRABAJO EXPERIMENTAL Y CÁLCULOS 72

3.1 Generalidades 73
3.2 Descripción de las Operaciones de Evaporación, Filtrado y Cristalización. 74
3.2.1 Estabilización del equipo evaporador . 74
3.3.2 Equipo de cristalización y filtración. 75
3.3 Parámetros de Control en el Evaporador . . 76
3.4 Resumen de las "Corridas" Experimentales en el Evaporador 78
3.4.1 Primera "corrida" experimental (Día 1) 78
3.4.2 Segunda "corrida" experimental (Día 2) 81
3.4.3 Tercera "corrida" experimental (Día 3) 83
3.4.4 Cuarta "corrida" experimental (Día 4). 85
3.5 Conclusiones de la Experimentación. . . . 86
3.6 Condiciones de Operación de trabajo en la Evaporación de Triple Efecto. 88

Capítulo **Página**

3.7 Condiciones de Operación de Trabajo en la Obtención de Cristales 89
3.8 Observaciones Acerca de los Productos Obtenidos 90
3.8.1 Cristales 90
3.8.2 Salmueras 91
3.8.3 Condensados 92
3.8.4 Productos de la filtración 92
3.9 Economía del Evaporador 93
3.9.1 Consumo de vapor vivo 93
3.9.2 Economía 95
3.10 Criterios para Definir el Proceso . . . 95
3.11 Comportamiento de la Salmuera al Evaporarse 97
3.12 Cálculo del Sistema de Evaporación . . . 99
3.13 Evaluación de los Equipos 102
3.13.1 Especificaciones de la centrífuga . 103
3.13.2 Especificaciones de la torre de enfriamiento 104
3.14 Instrumentación y Equipos de Control. . . 105
3.15 Operación de la Planta 108
3.15.1 Variables de operación 107
3.15.2 Manejo de condensados 109
3.15.3 Separación de Cristales de Sal . . 111
3.16 Concentración de sólidos; primer efecto. . 112

4. INSTALACIONES Y PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN EN LA PLANTA 114
4.1 Normas Generales de Seguridad 114
4.1.1 Diseño y construcción 116
4.1.2 Distribución por áreas 119
4.1.3 Descripción del proceso 120
4.1.4 Materias primas 124
4.1.5 Productos 125
4.1.6 Subproductos 125
4.1.7 Generación de residuos 126
4.1.8 Almacenamiento de materias primas . . 126
4.1.9 Almacenamiento de producto terminado . 127
4.2 Manejo del Agua 127
4.2.1 Agua sin tratar 127
4.2.2 Agua de enfriamiento 128
4.2.3 Descargas de agua 128
4.2.4 Drenajes 128
4.3 Energía Eléctrica y Combustibles 129
4.4 Procedimientos 149
4.4.1 De arranque general de la planta . . 130

Capítulo **Página**

4.8.2 De paro normal de la planta 136
4.8.3 De paro de emergencia 138
4.5 Balance de Materia y Energía 139
4.6 Diagrama de Tuberías e Instrumentos . . . 140

5. DISCUSIÓN 141
5.1 Propuesta de Solución Medioambiental . . . 141
5.2 Evaluación de la Propuesta Medioambiental . 144

6. CONCLUSIONES 147

7. GLOSARIO 150

REFERENCIAS 164

BIBLIOGRAFÍA 169

NOMENCLATURA 172

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO 173

LISTA DE FIGURAS

Figura **Página**

1.1 El Ciclo Hidrológico en la Tierra 6

2.1 Diagrama de Flujo del Proceso de Producción de Papel Reciclado, donde se Genera la Salmuera. . 55

2.2 Consumo Nacional Anual de Sal (NaCl) en el Período de 1994 a 1999 62

3.1 Esquema del Evaporador de Triple Efecto Utilizado 75

3.2 Diagrama de Fases que Muestra la Cristalización desde una Disolución que Contiene NaCl y KCl, a 25 y 100°C 98

LISTA DE TABLAS

Tabla **Página**

1.1 Caudal Descargado por Diferentes Tipos de Industrias 12

1.2 Valores Típicos de Concentración Salina junto con Criterios de Uso 38

1.3 Valores Limitantes para una Variedad de Parámetros 40

2.1 Análisis de la Salmuera en Base Iónica . . . 64

2.2 Análisis de la Salmuera con Base en el Contenido de Sales 65

3.1 Condiciones de Operación Medidas Experimentalmente en las Diferentes Secciones del Equipo Evaporador 77

3.2 Resumen de las Características del Evaporador . 89

3.3 Resumen de las Propiedades Químicas del Producto Obtenido 90

3.4 Propiedades de los Fluidos Utilizados en los Cálculos 101

3.5 Instrumentación Propuesta por Efecto 105

3.6 Instrumentación General Propuesta 106

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 El Agua en Relación con el Desarrollo de la Humanidad

Contar con agua de calidad y manejar adecuadamente las aguas residuales son dos de las más grandes preocupaciones de la sociedad en estos últimos tiempos, ello es debido principalmente a las legislaciones que en la materia han sido logradas gracias la presión de una sociedad más crítica y más involucrada.

Históricamente muchas de las enfermedades y padecimientos se desarrollaron en forma paralela con el crecimiento de las ciudades.

Lo anterior fue una consecuencia directa de los deficientes sistemas en uso para manejar y deshacerse de las aguas residuales de ciudades y pueblos, los que, para agravar la situación, contaban con un creciente número de habitantes. La mayoría de los ríos, lagos y zonas costeras se convirtieron en los receptores de las aguas residuales municipales, industriales y agrícolas, hasta el punto que en muchos casos se excedió la capacidad natural que estos ríos, lagos y zonas costeras tenían para eliminar diversos tipos de contaminantes.

De hecho, muchos de estos cuerpos de agua se contaminaron fuertemente con organismos patógenos de gran diversidad en algunos casos y con la introducción de diversos materiales químicos y hasta factores físicos, los que degradaron la calidad del agua y afectaron a los organismos acuáticos que normalmente viven en su medio. La combinación de tales factores fue la causa de muchos tipos de enfermedades y padecimientos sufridos por los antiguos pobladores de Europa y que todavía azotan a las poblaciones menos protegidas y empobrecidas del mundo actual.[1]

El problema del manejo de las aguas residuales se incrementó fuertemente conforme la población creció, así

como también crecieron las diversas actividades industriales, mineras, agrícolas y de comercio. Todo lo anteriormente dicho influyó para aceptar la necesidad de controlar las descargas de contaminantes sobre los cuerpos de agua.

De hecho, en Europa se empezaron a utilizar sistemas de filtración desde 1829, aunque el uso más extensivo de estas tecnologías fue lento para el resto del mundo no desarrollado, como América Latina, parte de Asia y la totalidad de África.

Muchas de esta aguas residuales contienen valiosos nutrientes o minerales que pueden hacerse regresar a los suelos, o que poseen un valor comercial que puede hacer tentador algún tipo de proceso de recuperación.

Las estrategias para controlar la contaminación del agua no han sido suficientes o se han implementado tardíamente prácticamente en todo el mundo.

Como consecuencia de ello, un gran número de ríos, lagos y mares tienen alarmantes niveles de contaminación.

1.1.1 El Agua como Receptor de Contaminantes

Las aguas superficiales, como son los ríos, presas y lagos, son en la mayoría de los casos el receptor inicial de las descargas de residuos y se constituyen en el medio de transporte de los mismos hasta el mar, afectando así no solamente la posibilidad de su empleo en las diversas actividades humanas, sino también en su capacidad para que la vida se desarrolle, tanto en los cuerpos de agua continentales como en los mares, que son el receptáculo final de los contaminantes.

Ante esta situación, y dada la creciente demanda que se tiene de este vital liquido, los gobiernos de los países desarrollados han llegado a establecer una serie de criterios de calidad que deben poseer las aguas cuando se destinen a las principales actividades humanas que la demanden.

Conformes al uso que se la destina, habrán de ser los requisitos de calidad que deberá poseer el agua; así, por ejemplo, si se tiene un agua destinada al consumo humano, ésta debe poseer una calidad superior a la destinada para la mayoría de los usos en la industria, y ésta, a su vez

deberá ser de mejor calidad que la utilizada para muchos tipos de riego agrícola.

1.1.2 El Ciclo Natural del Agua

La hidrología es la ciencia que estudia la distribución del agua en la Tierra, sus interacciones físicas y químicas con otras sustancias existentes en la naturaleza y su relación con la vida. El movimiento continuo de agua entre la Tierra y la atmósfera se conoce como ciclo hidrológico y éste es ilustrado en la Figura 1.1.[2]

Se produce vapor de agua por evaporación desde la superficie terrestre y de todos los cuerpos de agua (mares, ríos, pantanos, etc.) y por transpiración de los seres vivos. Este vapor circula por la atmósfera y se precipita en forma de lluvia o nieve.

Al llegar a la superficie terrestre, el agua sigue dos trayectorias. En cantidades determinadas por la intensidad de la lluvia, así como por la porosidad, permeabilidad, grosor y humedad previa del suelo, una parte del agua se vierte directamente en los riachuelos y

arroyos, de donde pasa a los océanos y a las cuerpos de agua continentales; el resto se infiltra hacia el subsuelo.

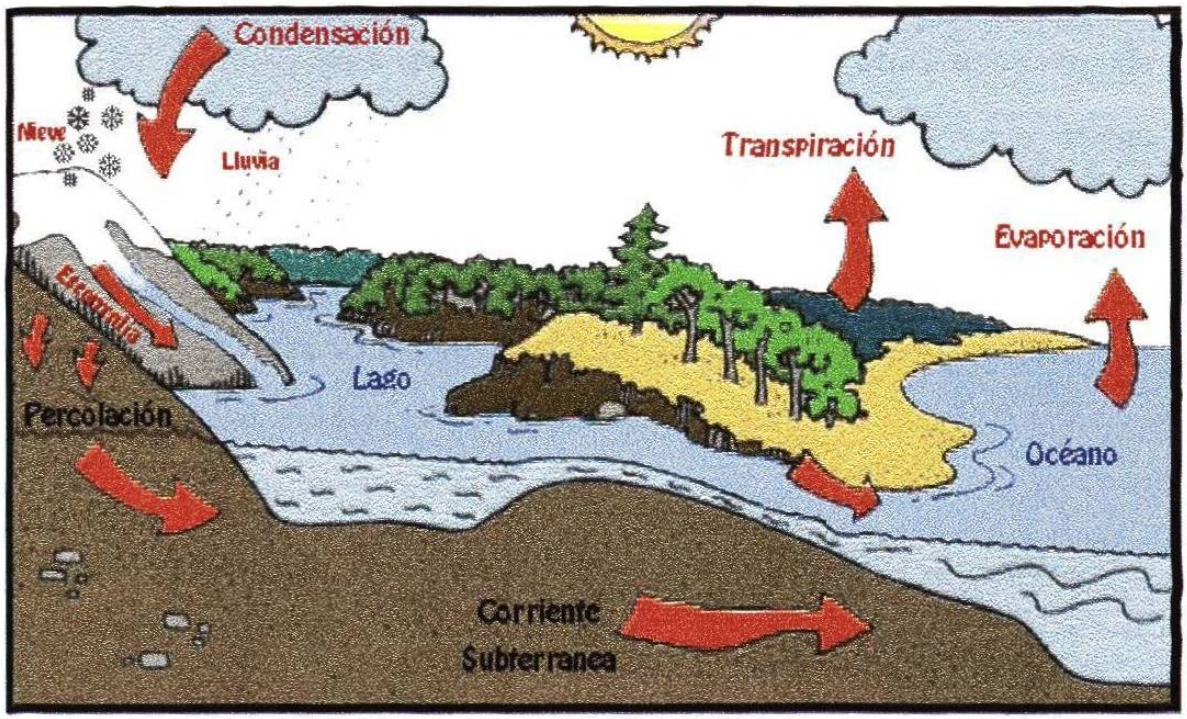

Figura 1.1 El Ciclo Hidrologico en la Tierra.

Una parte del agua infiltrada constituye la humedad del suelo y puede evaporarse directamente o penetrar en las raíces de las plantas para ser transpirada por las hojas.

La porción de agua que supera las fuerzas de cohesión y adhesión del suelo logra infiltrarse aún más, para seguir

su trayectoria descendente, acumulándose en la llamada zona de saturación, para formar un depósito de agua subterránea cuya superficie o espejo superior se conoce como nivel hidrostático o freático.

En condiciones normales el nivel freático aumenta de forma intermitente según se recarga por las lluvias y luego declina como consecuencia del drenaje continuo en desagües naturales como son los manantiales o por la explotación humana que efectúa extracciones desde pozos o norias equipados con bombas. [3]

1.1.3 Ciclo Hidrológico Modificado por la Actividad Humana

Una descarga es la acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor ya sea en forma continua, intermitente o fortuita, cuando éste es un bien del dominio público.

El agua pura casi no existe en la naturaleza debido a su capacidad para disolver numerosas sustancias en grandes cantidades. Incluso la lluvia o la nieve, absorben de la atmósfera cantidades importantes de dióxido de carbono y otros gases, así como pequeñas cantidades de material

orgánico e inorgánico presentes a grandes altitudes. Son bien conocidos los casos de lluvia radiactiva sobre la superficie de la Tierra, posteriores a pruebas de detonación de armamentos o de accidentes en centrales nucleares como la de Chernobyl, Rusia. [3]

En su circulación por la superficie y a través de la corteza terrestre, el agua interacciona con los minerales del suelo y de las rocas. Los principales componentes disueltos en el agua superficial y subterránea son los sulfatos, los cloruros, los bicarbonatos de sodio y potasio, y los óxidos de calcio y magnesio. Las aguas de la superficie suelen contener también residuos domésticos e industriales.

Las aguas subterráneas poco profundas pueden contener grandes cantidades de compuestos de nitrógeno y de cloruros, derivados de los desechos humanos y animales. Generalmente las aguas de los pozos profundos sólo contienen minerales en disolución. Casi todos los suministros de agua potable natural contienen fluoruros en cantidades variables. Se ha demostrado que una proporción adecuada de fluoruros en el agua potable reduce la ocurrencia de caries en los dientes.

El agua del mar contiene, además de grandes cantidades de cloruro de sodio o sal, muchos otros compuestos disueltos, debido a que los océanos reciben las impurezas procedentes de ríos y arroyos. Al mismo tiempo, como el agua pura se evapora continuamente la concentración del material disuelto aumenta, lo que proporciona al océano su carácter salino.[3]

1.1.4 Uso Industrial del Agua

Este uso se refiere al agua empleada por las industrias que se abastecen directamente de los cuerpos de agua y descargan a cuerpos receptores. No incluye plantas termoeléctricas ni industrias que se abastecen de las redes municipales de agua potable y vierten sus desechos en las redes de alcantarillado.

En México se estima que en 1994, el volumen suministrado a la industria, fuera de zonas urbanas fue de 2.46 km^3 (equivalente a un gasto de 78.7 m^3/s). Este volumen corresponde, con las necesidades de agua de 1387 empresas consideradas como las más importantes por su nivel de consumo y descarga sin considerar los 5.0 km^3 que cada año substraen las plantas termoeléctricas que utilizan agua

salobre. El 75% del consumo arriba señalado proviene de acuíferos subterráneos y el restante 25% es tomado de fuentes superficiales.

El 35% del volumen total de agua se utiliza como materia prima o como medio de producción en distintos procesos, por lo que su calidad es un factor importante para este uso.

Al evaluar la información de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua, se observó que en las condiciones actuales es difícil el aprovechamiento del agua superficial por la industria, ya que el 58% se clasifica como contaminada y el 21% como fuertemente contaminada.[4]

En 1994 el volumen estimado de descargas generadas por la industria fue de aproximadamente 2.05 km^3 (64.5 m^3/s), con 1.6 millones de toneladas de DBO al año, equivalente a la contaminación generada por 68 millones de habitantes.

El caudal tratado de aguas residuales es de 0.17 km^3/año (5.3 m^3/s), lo que representa sólo un 8% de lo generado, con una remoción estimada de 0.12 millones de toneladas de DBO.

El caudal sin tratar es de 1.88 km^3/año (59.2 m^3/s), conteniendo 1.28 millones de toneladas de DBO al año.[5]

La tecnología utilizada en la mayoria de los procesos industriales es poco eficiente en el uso del agua; esto se refleja en una extracción excesiva de agua y en una mayor producción de contaminantes, entre los que destacan ácidos, bases, grasas y aceites, metales pesados y sólidos suspendidos totales.

Las industrias que más agua utilizan y que más contaminan son: la azucarera, la química-petroquímica, la petrolera, la de celulosa y papel, la alimenticia y la metálica básica.

Algunas de estas industrias se establecieron en zonas de baja disponibilidad del agua, lo que ocasiona sobreexplotación de los acuíferos, contaminación de los ecosistemas y altos costos de oportunidad del agua.

Se estima que la demanda de agua al año 2000, llegó a 2.6 km^3/año (82 m^3/s), mientras que la descarga de aguas residuales ascendió a 2.1 km^3/año (66 m^3/s).[6]

CAUDAL DESCARGADO POR DIFERENTES TIPOS DE INDUSTRIA		
Industria	Caudal de aguas residuales (m^3/s)	Materia orgánica generada* (miles ton/año)
Azucarera	45.6	1869
Química	13.4	635
Petrolera	7.0	1247
Hierro y acero	4.5	93
Celulosa y papel	4.5	85
Textil	2.9	196
Beneficio de café	1.5	80
Cerveza y malta	1.4	95
Alimenticia	1.2	39
Agropecuaria	0.7	33
Acabado de metales	0.2	1.7
Curtiduría	0.1	13.3
Vitivinícola	0.1	5.3
*Medida en términ s de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)Fuente: Comisión Na~i nal del Agua 2		

TABLA 1.1 Caudal Descargado por Diferentes Tipos de Industria

1.1.5 Purificación del Agua

Las impurezas suspendidas y disueltas en el agua natural impiden que ésta sea adecuada para numerosos fines.

Los materiales indeseables, si se hallan suspendidos, ya sean orgánicos e inorgánicos, pueden ser removidos por métodos de criba y sedimentación, según sea su tamaño de

partícula y densidad. Otro método de tratamiento utiliza carbón activado, a fin de eliminar por adsorción los sabores y olores desagradables producidos por la presencia de solventes orgánicos, micro-contaminantes orgánicos, gases disueltos y hasta especies biológicas en el agua.

También se puede purificar el agua por filtración, o por cloración o irradiación, para eliminar microorganismos infecciosos.

En la aeración, o saturación de agua con aire, se hace entrar el agua en contacto con el aire de forma que se produzca la máxima difusión de oxígeno; esto se lleva a cabo normalmente en arreglos semejantes a fuentes, esparciendo agua en el aire. La ventilación elimina por desorción los olores y sabores producidos por la descomposición de la materia orgánica, al igual que son eliminados algunos desechos industriales como los fenoles, algunos gases y compuestos volátiles como el CO_2, el amoníaco o el sulfuro de hidrógeno. También convierte los compuestos de hierro y manganeso disueltos en óxidos hidratados insolubles que pueden ser extraídos con facilidad por precipitación.

1.2 Legislación Ambiental Aplicable

Las normas oficiales mexicanas especifican los límites máximos permisibles de contaminantes presentes en el agua residual de origen industrial. Sin embargo, algunos usos no tienen todavía establecidos estos límites.

La necesidad de atender de manera específica la administración de las aguas nacionales confluye en la decisión del Ejecutivo Federal de crear, en 1989, la Comisión Nacional del Agua como la autoridad federal responsable de administrar las aguas nacionales y sus bienes inherentes. Su Director General es designado por el Presidente de la República.

Por otra parte, en el contexto normativo de la administración pública federal, en julio de 1992 se publicó la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN),[7] misma que estableció las bases para la elaboración de Normas Oficiales Mexicanas (NOM), cuyo objeto es la regulación de productos y servicios cuando éstos puedan constituir un riesgo para la seguridad de las personas, afectar la salud humana, animal, vegetal o el medio

ambiente en general. Asimismo, se establece que corresponde a las dependencias de la administración pública federal expedir las NOM, según su ámbito de competencia.

Paralelamente, como eje articulador de las facultades y acciones de la CNA para la administración de los recursos hidráulicos, en diciembre de 1992 se expidió la Ley de Aguas Nacionales (LAN)[8] y en enero de 1994 se publicó su Reglamento.[9] La LAN es reglamentaria del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales y es de observancia general en todo el territorio nacional, sus disposiciones son de orden público e interés social y tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr el desarrollo integral sustentable.

De esta manera, la LAN se revitaliza con la recién revisada LFMN, con base en la cual se incluyen diversos apartados que hacen alusión a las NOM y, aunque de manera menos específica, a las normas de calidad de los productos y equipos que se utilicen en la infraestructura hidráulica,

mismas que vienen a ser las Normas Mexicanas (NMX) de acuerdo con las definiciones de la LFMN.

De esta manera se pueden señalar, entre otras muchas, las siguientes atribuciones de la CNA, mismas que están incluidas en la LAN:

- Ejercer las atribuciones que conforme a la presente ley corresponden a la autoridad en materia hidráulica, dentro del ámbito de la competencia federal.
- Administrar y custodiar las aguas nacionales y lo bienes nacionales y preservar y controlar la calidad de las mismas, así como manejar las cuencas en los términos de la LAN.
- Expedir las normas oficiales mexicanas en materia hidráulica en los términos de la LFMN.
- Promover, expedir y certificar el cumplimiento de las normas de calidad de los productos, equipos, maquinarias, materiales y servicios que se utilizan en la infraestructura hidráulica.

Si bien la CNA es un organismo desconcentrado de la extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y ahora de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la LAN le otorga de manera específica

atribuciones y responsabilidades congruentes con las acciones y políticas de la SEMARNAT.

La organización de la CNA le permite ocuparse del carácter multisectorial del agua en el ámbito central y en el regional, a través de sus Gerencias Regionales, mismas que progresivamente se han establecido conforme a cuencas hidrológicas.

1.2.1 Reglamentos Vigentes

El Reglamento de la Ley Nacional de Aguas, en su TITULO SÉPTIMO, relativo a la PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION DE LAS AGUAS, en su capitulo ÚNICO dice lo siguiente:

ARTICULO 134. Las personas físicas o morales que exploten, usen o aprovechen aguas en cualquier uso o actividad, están obligadas bajo su responsabilidad y en los términos de ley, a realizar las medidas necesarias para prevenir su contaminación y, en su caso, para reintegrarlas en condiciones adecuadas, a fin de permitir su utilización posterior en otras actividades o usos y mantener el equilibrio de los ecosistemas.

ARTICULO 135. Las personas físicas o morales que efectúen descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores a que se refiere la "Ley", deberán:

I. Contar con el permiso de descarga de aguas residuales que les expida "La Comisión", o en su caso, presentar el aviso respectivo a que se refiere la "Ley" y este Reglamento;

II. Tratar las aguas residuales previamente a su vertido a los cuerpos receptores, cuando esto sea necesario para cumplir con las obligaciones establecidas en el permiso de descarga correspondiente;

III. Cubrir, cuando proceda, el derecho federal por el uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la Nación como cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales;

IV. Instalar y mantener en buen estado los dispositivos de aforo y los accesos para muestreo que permitan verificar los volúmenes de descarga y las concentraciones de los parámetros previstos en los permisos de descarga;

V. Informar a "La Comisión" de cualquier cambio en sus procesos, cuando con ello se ocasionen modificaciones en las características o en los volúmenes de las aguas residuales que hubieran servido para expedir el permiso de descarga correspondiente;

VI. Hacer del conocimiento de "La Comisión", los contaminantes presentes en las aguas residuales que generen por causa del proceso industrial o del servicio que vienen operando y que no estuvieran considerados originalmente en las condiciones particulares de descarga que se les hubieren fijado;

VII. Operar y mantener, por sí o por terceros, las obras e instalaciones necesarias para el manejo y, en su caso, el tratamiento de las aguas residuales, así como para asegurar el control de la calidad de dichas aguas antes de su descarga a cuerpos receptores;

VIII. Sujetarse a la vigilancia y fiscalización que para el control y prevención de la calidad del agua establezca "La Comisión", de conformidad con lo dispuesto en la "Ley" y el "Reglamento";

IX. Llevar un monitoreo de la calidad de las aguas residuales que descarguen o infiltren en los términos de ley y demás disposiciones reglamentarias;

X. Conservar al menos durante tres años el registro de la información sobre el monitoreo que realicen, en los términos de las disposiciones jurídicas, normas, condiciones y especificaciones técnicas aplicables, y

XI. Las demás que señalen las leyes y disposiciones reglamentarias.

Las descargas de aguas residuales de uso doméstico que no formen parte de un sistema municipal de alcantarillado, se podrán llevar a cabo con sujeción a las normas oficiales mexicanas que al efecto se expidan y mediante un simple aviso.

ARTICULO 137. Es responsabilidad de los usuarios del agua y de todos los concesionarios a que se refiere el Capítulo II, del Título Sexto de la "Ley", incluidas las unidades y los distritos de riego, cumplir con las normas oficiales mexicanas y en su caso con las demás condiciones particulares de descarga para la prevención y control de la contaminación, extendida o dispersa, que resulte del manejo y aplicación de substancias que puedan contaminar la calidad de las aguas nacionales y los cuerpos receptores.

"La Comisión" promoverá y realizará, en su caso, las acciones y medidas necesarias y se coordinará con las autoridades competentes para la expedición de las normas oficiales mexicanas que se requieren para hacer compatible el uso del suelo con los objetivos de prevención y control de la contaminación de las aguas y bienes nacionales. En la fijación de normas oficiales para el uso del suelo, que puedan afectar aguas nacionales, se deberá recabar la opinión técnica de "La Comisión".

1.2.2 Normas Oficiales Mexicanas

NORMA OFICIAL MEXICANA: NOM-001-ECOL-1996 [10]

"QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES."

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes pluviales independientes.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-002-ECOL-1996 [11]

"QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL."

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o

municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales ni a las generadas por la industria que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.

Además, se cuenta con las siguientes normas mexicanas o métodos de prueba aplicables:

Norma Mexicana NMX-AA-003 Aguas residuales - Muestreo, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 25 de marzo de 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-004 Aguas - Determinación de sólidos sedimentables en aguas residuales - Método del cono Imhoff, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 13 de septiembre de 1977.

Norma Mexicana NMX-AA-005 Aguas - Determinación de grasas y aceites - Método de extracción soxhlet, publicada

en el **Diario Oficial de la Federación** el 8 de agosto de 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-006 Aguas - Determinación de materia flotante - Método visual con malla específica, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 5 de diciembre de 1973.

Norma Mexicana NMX-AA-007 Aguas- Determinación de la temperatura - Método visual con termómetro, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 23 de julio de 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-008 Aguas - Determinación de pH -Método potenciométrico, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 25 de marzo de 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-026 Aguas - Determinación de nitrógeno total - Método Kjeldahl, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 27 de octubre de 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-028 Aguas - Determinación de demanda bioquímica de oxígeno- Método de incubación por diluciones, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 6 de julio de 1981.

Norma Mexicana NMX-AA-029 Aguas - Determinación de fósforo total - Métodos espectrofotométricos, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 21 de octubre de 1981.

Norma Mexicana NMX-AA-034 Aguas - Determinación de sólidos en agua - Método gravimétrico, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 3 de julio de 1981.

Norma Mexicana NMX-AA-042 Aguas - Determinación del número más probable de coliformes totales y fecales - Método de tubos múltiples de fermentación, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 22 de junio de 1987.

Norma Mexicana NMX-AA-046 Aguas - Determinación de arsénico en agua-Método espectrofotométrico, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 21 de abril de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-051 Aguas - Determinación de metales - Método espectrofotométrico de absorción atómica, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 22 de febrero de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-057 Aguas - Determinación de plomo - Método de la ditizona, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 29 de septiembre de 1981.

Norma Mexicana NMX-AA-058 Aguas - Determinación de cianuros - Método colorimétrico y titulométrico, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 14 de diciembre de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-060 Aguas - Determinación de cadmio - Método de la ditizona, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 26 de abril de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-064 Aguas - Determinación de mercurio - Método de la ditizona, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 3 de marzo de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-066 Aguas - Determinación de cobre - Método de la neocuproína, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 16 de noviembre de 1981.

Norma Mexicana NMX-AA-078 Aguas - Determinación de zinc - Métodos colorimétricos de la ditizona I, la ditizona II y espectrofotometría de absorción atómica, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 12 de julio de 1982.

Norma Mexicana NMX-AA-079 Aguas Residuales- Determinación de nitrógeno de nitratos (Brucina), publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 14 de abril de 1986.

Norma Mexicana NMX-AA-099 - Determinación de nitrógeno de nitritos- Agua potable, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 11 de febrero de 1987.

1.3 Criterios de Calidad del Agua

Algunas definiciones que se utilizan al hablar de la calidad del agua son la siguientes:

Metales pesados y cianuros.

Son aquellos que, en concentraciones por encima de determinados límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana, la flora o la fauna. Incluso el tratamiento bioquímico de las aguas de desecho mediante lodos activados, puede dificultarse debido a la presencia de metales pesados y cianuros, los cuales son capaces de inhibir la actividad de los microorganismos.

En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran las siguientes especies: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc y cianuros.

Carga contaminante.

Es la cantidad de un contaminante expresada en unidades de masa por unidad de tiempo, aportada por una descarga de aguas residuales.

Condiciones particulares de descarga.

El conjunto de parámetros hidrométricos, físicos, químicos y biológicos, en combinación con sus niveles máximos permitidos en las descargas de agua residual, determinados por la Comisión Nacional del Agua para el responsable o grupo de responsables de la descarga o para un cuerpo receptor específico, con el fin de preservar y controlar la calidad de las aguas conforme a la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento.

Contaminantes básicos.

Son aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos

convencionales. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno de nitritos y nitratos, determinadas por el método Kjeldahl y expresadas en mg/L de nitrógeno), fósforo total, temperatura y pH.

Contaminantes patógenos y parasitarios.

Son aquellos microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo para la salud humana, la flora o la fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana, sólo se consideran los coliformes fecales y los huevos de helminto.

Cuerpo receptor.

Se llama así a las corrientes, depósitos naturales de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan dichas aguas cuando puedan contaminar el suelo o los acuíferos.

1.3.1 Contenido de Sales Solubles

La dureza de las aguas naturales es producida sobre todo, por las sales de calcio y magnesio; aunque también pero en menor proporción, por el hierro, el aluminio y otros iones metálicos. La dureza debida a los bicarbonatos y carbonatos de calcio y magnesio se denomina dureza temporal y puede eliminarse por ebullición, operación que al mismo tiempo esteriliza al agua. La dureza residual se conoce como dureza permanente. Las aguas con dureza debida a calcio y magnesio pueden ablandarse añadiéndoles carbonato de sodio y cal (proceso cal-soda de ablandado), o haciéndolas pasar a través de zeolitas naturales o artificiales, capaces de retener los iones metálicos que producen la dureza, mientras a manera de intercambio liberan iones sodio hacia el agua.

El efecto nocivo de las sales solubles, se debe a que produce presiones osmóticas en el suelo que esta en contacto con las raíces de las plantas, las cuales, al pasar de ciertos valores, ocasionan disminuciones en los rendimientos o pérdidas totales de las cosechas. Estos efectos se manifiestan en forma diferente de acuerdo con el tipo de cultivo y las etapas de desarrollo. [12]

1.3.2 Criterios para Evaluar el Agua Destinada al Uso Agrícola.

Una vez cubiertas las necesidades de agua para fines domésticos, de servicios públicos urbanos y abrevaderos de ganado, el articulo 27 de la Ley Federal de Aguas, establece que el uso que les sigue a los anteriores, en orden de importancia, es el riego de terrenos.

En el agua destinada al riego agrícola es necesario tomar en consideración la calidad de la misma en relación al tipo de planta que va a cultivarse y a los suelos que se encuentran en el área de riego.

Las relaciones complejas que existen entre el agua, el suelo y el cultivo dan lugar a la existencia de un equilibrio muy delicado, el cual puede ser alterado, significativamente, si las aguas utilizadas para riego no reúnen las condiciones de calidad adecuadas.

En México, no se cuenta con un reglamento que determine los parámetros más importantes, y sus concentraciones límites, que pueden estar presentes en las aguas para uso agrícola.

En términos generales, se puede decir que son tres los criterios principales que permiten juzgar la conveniencia o limitación del agua con fines de riego de cultivo agrícola.

Estos criterios son:

a) El contenido de sales solubles

b) El efecto probable del sodio sobre las características físicas de los suelos

c) El contenido de elementos tóxicos para las plantas.

El contenido de sales se estima por medio de la conductividad eléctrica, cantidades elevadas originan disminución en la disponibilidad de agua en la zona radical, con la consiguiente reducción de rendimientos debida al efecto osmótico.

La presencia de sodio intercambiable crea condiciones de inestabilidad de los agregados del suelo y del sistema poroso, el hinchamiento y la dispersión coloidal restringen la permeabilidad del suelo al agua y a los gases, y conduce consecuentemente a problemas de anegamiento, encostramiento, escurrimiento y pobre aeración.

Las aguas de mala calidad con alto contenido de metales pesados, pueden además, producir o potenciar los efectos tóxicos en los cultivos. [13]

1.3.2.1 Degradación del Suelo

Los suelos constituyen un puente entre los elementos bióticos y lo inerte; en los suelos se halla el sustrato básico para la producción y en ellos se desarrollan procesos esenciales para la conservación de los ecosistemas. Los suelos son también un depósito de carbono y bajo ellos se hallan la riqueza mineral y el agua que utilizamos los seres vivos.

La degradación de los suelos se refiere al efecto negativo sobre las características físicas, químicas y biológicas de ellos, todo lo cual altera su capacidad de sustentar la producción de biomasa, de infiltrar el agua y de capturar carbono.

La degradación del suelo se inicia con la alteración de los ecosistemas naturales, acelerándose en la medida en que las actividades productivas no contemplan medidas destinadas a su manejo y conservación. El deterioro de los

suelos provoca la degradación de la tierra, fenómeno conocido como desertificación, que se refiere al proceso que desemboca en la pérdida de la capacidad de la tierra para desarrollar algún tipo de vida y por consiguiente, sostener actividades productivas primarias. Esta condición está asociada a la pobreza rural y a la pérdida de servicios ambientales.

La pérdida de calidad y cantidad de suelo puede deberse a varios procesos: erosión, salinización, contaminación diversa, mal drenaje, acidificación, laterización y pérdida de la estructura del suelo, o a una combinación de dos o más de esos procesos.

El proceso de degradación más importante es la pérdida de suelo por acción del agua, el viento y los movimientos en masa y, más localizadamente, por la acción de los vehículos y el pisoteo de humanos y animales. Aunque sólo es grave en algunas áreas, sus efectos acumulativos y de largo plazo ofrecen abundantes motivos de preocupación. La pérdida de las capas u horizontes superiores, los cuales contienen a la materia orgánica y nutrientes, y el adelgazamiento de los perfiles del suelo, reducen el rendimiento de las cosechas en suelos degradados.

La salinización es la concentración anormalmente elevada de sales (de sodio por ejemplo) en el suelo, debida a la fuerte evaporación. Se observa a menudo asociada a la irrigación con aguas cuyo alto contenido de sales disueltas conduce eventualmente a la muerte de las plantas y a la pérdida de estructura del suelo.

Causas frecuentes de contaminación del agua son los residuos de las granjas y los lodos de desecho del tratamiento de aguas residuales, estos últimos se sabe que pueden contener concentraciones elevadas de metales pesados.

Los suelos también se han visto contaminados por isótopos radiactivos procedentes de las pruebas nucleares y, a escala restringida, aunque localmente muy grave y de largo alcance en tiempo, los accidentes en centrales nucleares como el caso ya antes mencionado de Chernobyl en 1986.

La contaminación puede deberse también a otros residuos químicos o a subproductos de procesos industriales.

Algunos suelos son naturalmente ácidos, pero también pueden acidificarse por la acción de la lluvia ácida o de la deposición en seco de gases y partículas ácidas. La lluvia ácida tiene un pH inferior a 5.6.

La principal causa atmosférica de la acidificación es la creciente presencia de óxidos de azufre y nitrógeno emitidos por la quema de combustibles fósiles que fácilmente encuentran su camino hacia la atmósfera, en donde permanecen suspendidos hasta que la lluvia o la nieva los arrastran y hacen precipitar a tierra.

La pérdida de materia orgánica debida a la erosión y a la oxidación degrada el suelo y en especial lo afecta en su valor como medio y sostén para el cultivo.

La pérdida de materia orgánica reduce también la estabilidad de los agregados del suelo que, bajo el impacto de las precipitaciones, pueden dispersarse.

Este proceso puede llevar a la formación de una corteza sobre el suelo que reduce la infiltración del agua e inhibe la germinación de las semillas.

La perdida de estructura por parte del suelo puede deberse a la pérdida de materia orgánica, a la compactación producida por la maquinaria agrícola y el cultivo en estaciones húmedas, o a la dispersión de los materiales en el subsuelo, sin dejar de lado los cambios en la estructura cristalina de las arcillas que componen a los suelos y que son debidos a las altas concentraciones salinas en el agua de irrigación. [14]

1.3.3 Índices para Evaluar el Agua Destinada a la Ganadería

Según lo establecido en el artículo 27 de la Ley Federal de Aguas "el agua destinada a abrevaderos de ganado es la que sigue en orden de importancia a los usos domésticos y servicios públicos urbanos."

El agua destinada al consumo del ganado generalmente debe de cumplir con los requisitos establecidos para el agua potable, sin embargo existen diferencias notables que dependen fundamentalmente del tipo de ganado que habrá de ingerir el agua.

Los criterios de calidad del agua para abrevaderos están basados en el uso típico, ya que la cantidad de substancias que puede ingerir el ganado depende de la concentración de éstas y de la cantidad de agua ingerida.

La Tabla 1.2 muestra los valores típicos de concentración salina junto con criterios de uso recomendado.[15]

Los efectos que pueden tener las substancias toxicas sobre los animales varían según el estado general del animal.

En la evaluación de los criterios no sólo es importante la salud del animal, sino también de las personas que lo consumen.

El parámetro más importante de los criterios de calidad del agua para este uso particular es la concentración de sales disueltas, ya que una alta concentración de estas puede causar alteraciones osmóticas serias e incluso hasta la muerte del animal. [15]

SALINIDAD TOTAL (mg/L)	USO RECOMENDADO
< 1,000	Excelente para todo tipo de ganado, mayor y menor.
1,000-3,000	Satisfactorio para todo tipo de ganado, puede provocar diarrea leve y temporal.
3,000-5,000	Satisfactoria para el ganado mayor, puede provocar diarrea temporal o no ser aceptada por los animales en un principio. En la avicultura puede provocar un incremento en mortandad y limitar el crecimiento.
5,000-7,000	Se puede utilizar con relativa seguridad en vacunos, equinos, ovinos y porcinos. Evitar el uso en hembras preñadas o animales lactantes. Inadecuada para avicultura.
7,000-10,000	Inaceptable para avicultura y posiblemente para porcicultura, considerablemente riesgoso emplearla en vacas, yeguas u ovejas preñadas, así como en los especimenes jóvenes. Su uso se debe evitar aunque los especimenes mayores pueden subsistir bajo ciertas condiciones.
> 10,000	Los riesgos al emplear esta agua son tan considerables que no se recomienda su utilización bajo ninguna circunstancia.

TABLA 1.2 Valores Típicos de Concentración Salina junto con Criterios de Uso

1.3.4 Valores Máximos Permisibles de Substancias Tóxicas en el Agua

No se deben descargar o depositar en los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, así como tampoco en las aguas y bienes nacionales, todos aquellos materiales o residuos considerados peligrosos conforme a la regulación vigente en la materia (Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996).[11]

La tabla 1.3 muestra los valores limitantes para una variedad de parámetros.

Los límites máximos permisibles establecidos en la columna con el encabezado de "instantáneo" son únicamente valores de referencia.

En el caso de que el valor de cualquier análisis exceda al instantáneo, el responsable de la descarga queda obligado a presentar a la autoridad competente, en el tiempo y forma que establezcan los ordenamientos legales locales, los promedios diario y mensual, así como los resultados de laboratorio de los análisis que los respaldan.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES			
PARÁMETROS (en miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	**Promedio Mensual**	**Promedio Diario**	**Instantáneo**
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12
Tabla 1.1 de la Norma Oficial Mexicana NOM-002 ECOL-1996			

Tabla 1.3 Valores Limitantes para una Variedad de Parámetros

1.4 Parámetros Indicadores de la Calidad del Agua

Se toma como referencia la Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y del tratamiento de aguas residuales vertidas a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal.

El límite máximo permisible de la temperatura es de 40°C (cuarenta grados Celsius), medida en forma instantánea a cada una de las muestras simples.

Se permitirá descargar con temperaturas mayores siempre y cuando se demuestre a la autoridad competente, por medio de un estudio sustentado, que ello no causa daños al sistema.

La materia flotante debe estar ausente en las descargas de aguas residuales, de acuerdo al método de prueba establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-006.

1.4.1 Potencial de Hidrógeno

La determinación del pH es muy útil en la ingeniería del medio ambiente. Por ejemplo, en los sistemas de abastecimiento de aguas el pH influye en los procesos de coagulación química, desinfección, ablandamiento y control de corrosión.

El método se basa en la teoría de la disociación electrolítica.[16] Esta teoría establece que cuando se disuelve en agua un ácido, una base o una sal, una porción considerable del soluto se disocia espontáneamente en iones positivos y negativos, esto es:

$$AB = A^{+} + B^{-}$$

El intervalo permisible de pH (potencial de hidrógeno) en las descargas de aguas residuales es de 5.5 (cinco punto cinco unidades que corresponde a acidez) a 10 (diez unidades que corresponde a basicidad), determinado por medición para cada una de las muestras simples. Las unidades de pH no deberán estar fuera del intervalo permisible en ninguna de las muestras simples.

1.4.2 Conductividad

La determinación de la conductividad eléctrica de las aguas proporciona un medio rápido y conveniente de estimar la concentración electrolítica. La determinación es efectuada por potenciometría, como la de pH, sirviendo de manera directa para estimar el contenido de sales disueltas. [16] Como regla general, mientras mayor sea la conductividad del agua, mayor es la concentración de sales disueltas en ella.

Esta propiedad depende de la fuerza iónica del agua, relacionada con las diversas sustancias disueltas, sus concentraciones actuales y relativas y la temperatura a la cual se hace la medición.

1.4.3 Alcalinidad Total

La alcalinidad es causada por la presencia de diversas especies entre las que se mencionan como principales a los carbonatos, bicarbonatos e hidroxilos. Esta determinación se hace con la finalidad de conocer la capacidad del agua para neutralizar a los ácidos. [16]

La presencia de la alcalinidad en las aguas es de vital importancia, ya que ella puede ocasionar fuertes problemas durante el tratamiento para hacerla potable, fundamentalmente porque la alta alcalinidad no permite la acción de los coagulantes de hierro y aluminio durante el tratamiento.

1.4.4 Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en las aguas de desecho nos indica si los cambios biológicos observados son debidos a organismos anaerobios o aerobios, además el oxígeno disuelto en aguas naturales es vital para mantener las condiciones aerobias en las aguas que reciben descargas de las industrias y preservar el equilibrio natural en el agua.

La determinación de oxígeno disuelto se hace por el método de Winkler y se basa en la oxidación del Ion mangánico por el oxígeno disuelto en un medio fuertemente alcalino. [16] Posteriormente, al acidificar la solución en presencia de un yoduro, el Ion mangánico presente oxida al yoduro y libera yodo en una cantidad equivalente al oxígeno disuelto que existía originalmente en la muestra.

1.4.5 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La información que se obtiene de los análisis de DBO en aguas de desecho es de vital importancia en el diseño de plantas tratadoras de aguas residuales, el DBO es un factor a considerar al momento de determinar el tamaño de ciertas unidades como filtros biológicos o unidades de lodos activados.

El método utilizado para determinar el DBO se basa en la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos a fin de efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en el agua. [16] Ello se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto final al cabo de 5 días de incubación a 2193 °K. El resultado obtenido se conoce como DBO_5.

1.4.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La prueba de DQO, ampliamente utilizada en el análisis de aguas de desecho industriales junto con la información de DBO, es de gran ayuda en la determinación de las condiciones de toxicidad, así como de la presencia posible de organismos resistentes a las condiciones presentes.

El método utilizado para determinar el DQO en agua se basa en la oxidación enérgica de la materia orgánica y de la inorgánica oxidable que se encuentra en el agua, en un medio fuertemente ácido, mediante una solución valorada de dicromato de potasio. [16] El exceso del agente oxidante se titula con una solución valorada de sulfato ferroso amónico en presencia del complejo ferroso de orto-fenantrolina como indicador interno.

1.4.7 Sólidos en Todas sus Formas

El conocimiento de la cantidad de sólidos presentes en agua destinada al consumo humano es de mucha importancia pues estos resultados indicarán si el agua se halla dentro de los parámetros de calidad.

Los límites máximos permisibles para los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales, que debe cumplir el responsable de la descarga a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, son los establecidos en la Tabla 2 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996,[10] o a las condiciones particulares de descarga que corresponde cumplir a la descarga municipal.

1.4.8 Grasas y Aceites

Las grasas y aceites deben ser removidas ya que debido a su baja solubilidad presentan una tendencia a separarse de la fase acuosa. La presencia de grasas y aceites también afecta a la capacidad de los sistemas de drenaje y conducción de aguas de desecho, ya que la grasa se adhiere a las paredes interiores de los ductos, reduciendo el área interior de las tuberías.

1.4.9 Fósforo

El fósforo, junto con varios compuestos de nitrógeno, es un nutriente importante para el crecimiento de los organismos y puede ser el factor limitante de la productividad primaria en los cuerpos de agua. Por otro lado, cantidades pequeñas de algunos fosfatos se agregan al tratamiento de agua para calderas.

1.4.10 Nitrógeno

El nitrógeno orgánico procedente de restos de plantas, animales y de productos excretados, se descompone rápidamente, produciendo amoniaco y sales amoniacales. [16]

La química del nitrógeno es compleja, debido al gran número de estados de oxidación que puede tomar el nitrógeno, y cómo éstos pueden influir en las bacterias y otros organismos vivos.

1.4.11 Detergentes

Los detergentes (SAAM) causan problemas de espumas en aguas superficiales, lagos, plantas de lodos activados y, en general, en sitios donde se mezclan aguas residuales que los contengan.[16] Los detergentes contribuyen con concentraciones muy variables a la contaminación de las aguas residuales, generalmente aportando concentraciones de 1 a 20 mg/L.

1.4.12 Dureza

Las aguas naturales contienen diversas cantidades de sales y son de composición muy variada.

La dureza del agua se debe principalmente a las sales solubles de calcio y magnesio, los cuales reaccionan con el jabón para dar sales insolubles principalmente estearatos, palmitatos, oleatos y otros.

La presencia de dureza en las aguas para consumo humano es de vital importancia pues cuando ella es alta provoca acumulamiento de minerales en órganos y tejidos del cuerpo humano, dando origen a la formación de piedras en los riñones. Por otra parte, algunos usos industriales del agua evitan la dureza pues es causante de incrustaciones, principalmente en equipos de transferencia de calor, evaporadores, calderas, etc.

1.5 Panorama actual

La presencia de agua en la naturaleza, en cantidad y calidad suficiente, y en tiempo y espacio adecuado, es imprescindible para mantener el equilibrio de todos los ecosistemas. Esta aseveración debe tomarse en cuenta especialmente en el caso de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, debido a que de éstos se extrae el agua para consumo humano y para actividades productivas, y son los directamente afectados en los casos en los que los aprovechamientos sean excesivos, las descargas rebasen la capacidad de depuración natural del cuerpo de agua, o la modificación de sus estructura natural

no considere la prevención y mitigación de los impactos ambientales generados.

Actualmente, en México el 70% del volumen de agua que se suministra a las ciudades proviene del subsuelo, con lo que se abastecen aproximadamente 75 millones de personas (55 millones de los mayores centros urbanos y prácticamente 20 millones del medio rural). El agua subterránea se ha convertido en un elemento indispensable en el suministro a los diferentes usuarios, bien sea en las regiones áridas, donde constituye la fuente de abastecimiento más importante y a menudo única, o en las diferentes ciudades del territorio las cuales han tenido que recurrir a ella para cubrir sus crecientes requerimientos de agua. [17]

Así mismo, el deterioro de la calidad del agua de numerosos acuíferos, principalmente por intrusión salina y migración de agua fósil de mala calidad, ha sido provocado por la sobreexplotación, así como por la contaminación generada en las ciudades y zonas agrícolas.

La mayoría de los cuerpos de agua superficial del país reciben descargas de aguas residuales sin tratamiento, ya sea de tipo domestico, industrial, agrícola o pecuario, lo

que ha ocasionado grados variables de contaminación que limitan el uso directo del agua.

La contaminación, sobre todo por los efluentes municipales e industriales, degrada la calidad del agua. La capacidad instalada de los sistemas de saneamiento municipal equivale a 45% de la totalidad de las descargas.[18]

En materia de tratamiento de aguas residuales a diciembre de 2000, se tenían en inventario 1479 plantas de tratamiento industriales, con una capacidad de diseño de 41.5 m^3/s, de las cuales operan 1399 con un gasto de 25.3 m^3/s (aproximadamente 15% de las descargas).[19]

La reutilización del agua se constituye como una alternativa de gran relevancia en los estados áridos y semiáridos del país, donde uno de los principales problemas es la escasez del recurso.

Si bien, a la fecha el desarrollo económico de la región noreste del país (donde se encuentra ubicada la planta),es sobresaliente, en el futuro este desarrollo se podría ver seriamente afectado por la limitación del recurso agua, el cual presenta una escasez natural, tanto

149816

superficial como subterránea, por lo que de continuar con las tendencias actuales, de extracciones superiores a la recarga, un deficiente e inadecuado manejo del agua, en los sectores agrícola y público urbano, el vertimiento incontrolado de contaminantes, principalmente por la industria química, así como el constante deterioro de las fuentes de abastecimiento, se limitaría aun más el aprovechamiento de las mismas, con lo que se lograría una competencia mayor por el recurso, a lo que se añadirían los problemas para conseguir el abasto a los principales núcleos urbanos y centros de producción agrícolas e industriales.[20]

Dado lo anterior, el proceso propuesto evitará la disposición o tratamiento municipal de un efluente generado en la industria del papel; se propone el desarrollo de esta investigación que concluirá con la puesta en marcha de una planta de evaporación de triple efecto, para dar tratamiento a un efluente salino proveniente de la planta papelera y de esta manera cumplir con la política de cero descargas, como se verá más adelante.

CAPÍTULO 2

GENERACIÓN DE SALMUERA EN LA INDUSTRIA DEL PAPEL RECICLADO

2.1 Introducción

El aumento de la demanda de papel para la vida cotidiana ha multiplicado la posibilidad de utilizar papel de desecho y cartón como materia prima para producir la pasta de papel; con ello se consigue un gran ahorro de energía en el proceso de fabricación de la pasta virgen (a partir de celulosa) y la ventaja adicional de no tener que utilizar madera de los bosques. Las técnicas de reciclaje han evolucionado con mucha rapidez desde la II Guerra Mundial, y los dos sistemas principales de recuperación se aplican sobre papel impreso, que incluye el lavatorio de la

tinta, y sobre papel de envoltorio y cartón, de mayor rugosidad y porosidad y con ausencia de grabados.[22]

Estos son procesos que demandan una cantidad muy alta de agua para producir el papel reciclado, del orden de 100 a 400 ton de agua por ton de papel,[24] por lo que la instalación de equipos para tratar el agua, en vez de simplemente desecharla, deben de considerarse desde la concepción misma del proyecto o de lo contrario estos proyectos estarían económicamente prohibidos por la cantidad de agua residual que generan y de la cual habría que disponer adecuadamente.

Dado que esta forma descrita de producir papel es un proceso de reciclado, el cual evita la degradación de uno de los recursos no renovables mas amenazados en nuestros días como lo son los árboles, y a la vez hace necesario cuidar de otro recurso como lo es el agua, la cual después de utilizarse en el proceso productivo debe ser sometida a varios tratamientos que incluyen un primario mediante Flotación por Aire Disuelto y filtros rotatorios de tipo Tambor, un tratamiento secundario que consiste en un reactor con lodos activados y por último un tratamiento terciario que consiste en una micro filtración y una

ósmosis inversa. Es en el último tratamiento en donde se genera la salmuera que posteriormente debe tratarse en la planta evaporadora.

La Figura 2.1 muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso de obtención de papel reciclado, en donde se incluye también la generación de salmuera.

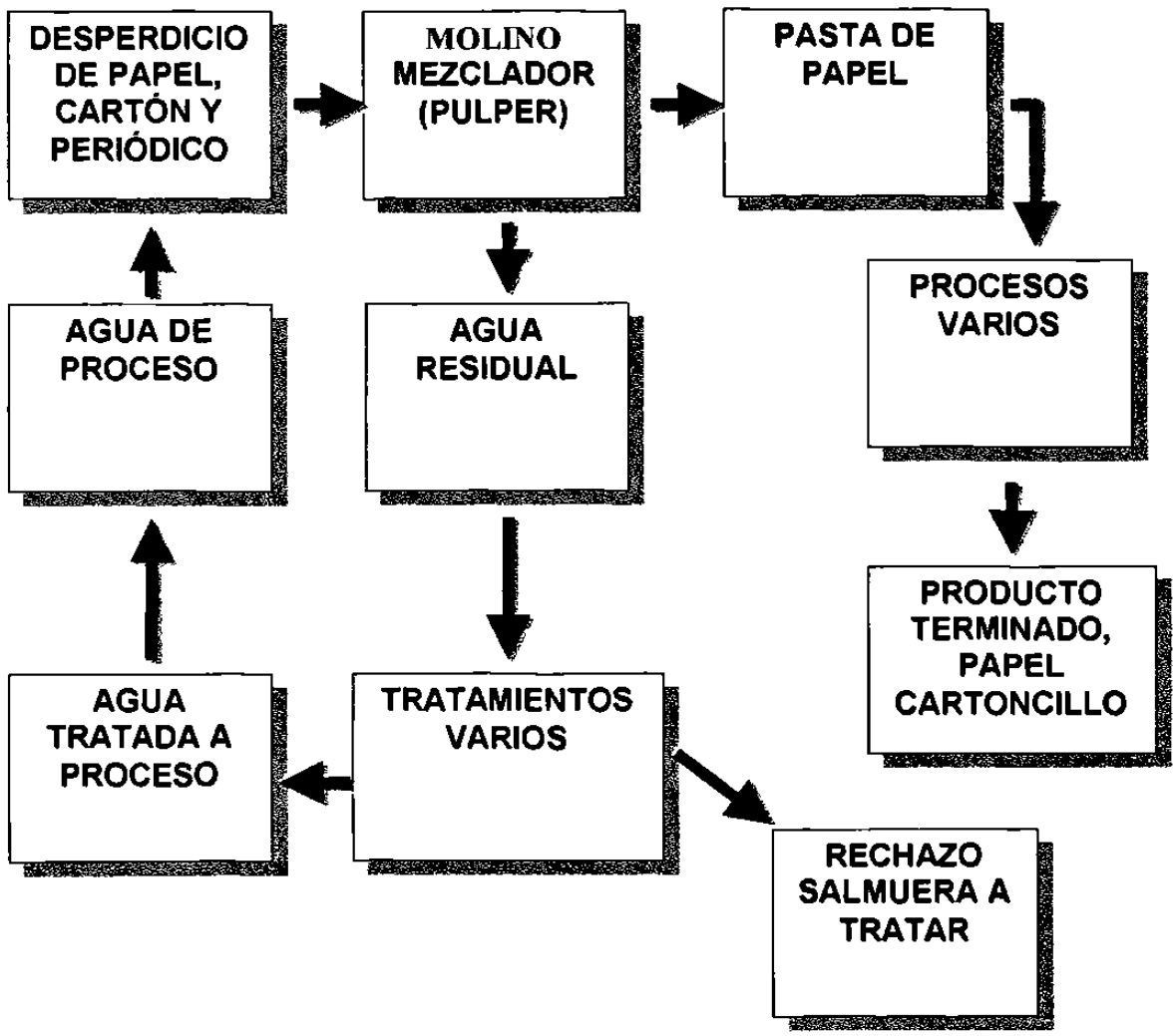

Figura 2.1, Diagrama de Flujo del Proceso de Produccion de Papel Reciclado, donde se Genera la Salmuera.

2.2 Necesidad de tratar la Salmuera por Razones Legales y Económicas

2.2.1 Razones Legales.

Las normas oficiales mexicanas, específicamente NOM-001-ECOL-1996[10] y NOM-002-ECOL-1996,[11] establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, así como los limites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal respectivamente.

A partir de 1997 se toma como base de pago la norma ecológica NOM-001-ECOL-1996, en ésta norma se establece el monto del derecho, de acuerdo con el excedente al límite permitido de los parámetros listados en la norma referida. Para garantizar el cumplimiento de las disposiciones legales se efectúan visitas de inspección y medición, así como verificación del cumplimiento de las disposiciones fiscales que tiene el contribuyente en materia de aguas residuales.

La legislación vigente establece que todos los usuarios deben medir el volumen de agua que extraen, así como el volumen y la calidad del agua que descargan y otorga facultades a la CNA para verificar el cumplimiento de las condiciones establecidas en sus títulos de concesión o asignación.

Las acciones para el control de la contaminación se realizan mediante el impulso del cumplimiento de las normas ecológicas para descargas de aguas residuales y de las condiciones particulares de descarga, existentes para el giro de las actividades económicas y de acuerdo con las características de los cuerpos receptores y usos ulteriores del agua.

Mientras que el reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, establece que, Las personas físicas o morales que efectúen descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores deberán: Contar con el permiso de descarga de aguas residuales que les expida "La Comisión" además de tratar las aguas residuales previamente a su vertido a los cuerpos receptores, para dejarlas en las condiciones particulares de descarga que se les hubieren fijado, la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua[23] en su articulo 276

establece la obligación del pago de derechos por uso o aprovechamiento de cuerpos receptores del dominio publico, a quien descargue en forma permanente o fortuita aguas residuales, mientras que en el articulo 278 de la referida Ley se establecen las cuotas.

2.2.2 Razones económicas.

El mercado de la sal industrial es muy variable y se mueve por la ley de la oferta y la demanda por lo que los contratos para proveer de sal industrial a los diferentes clientes se efectúan por separado y se toma en cuenta la cantidad a vender así como el flete y las especificaciones del cliente, pero el precio de venta debe oscilar entre los US $60 Dlls. ó US $70 Dlls. por tonelada de sal. Lo cual lo hace un proceso atractivo desde el punto de vista económico.

2.2.3 Usos de la Sal

La sal común (NaCl) tiene más de trece mil aplicaciones y usos en diferentes campos. Algunos de los principales usos de la sal son descritos enseguida.

- **Alimentación Humana:** La sal tiene un papel muy importante en la alimentación humana y también es usada en gran escala para la conservación de alimentos.

- **Industria Química:** Hace posible la fabricación de vidrio, jabón, plástico, papel, pinturas, hule sintético, cosméticos, medicamentos y pilas eléctricas; es fundamental en procesos industriales como Cloro sosa, tratamiento de aguas, petroquímica.

- **Salmuera (disolución de sal común en agua):** Suele emplearse en muchas instalaciones frigoríficas para transportar el frío desde el líquido -o gas refrigerante- hasta las cámaras de refrigeración; esto se debe a la baja temperatura de congelación de la salmuera, que le permite transmitir el frío sin cristalizarse.

- **Conservación Peletera:** Después de pesar las pieles, se efectúa la salazón con objeto de permitir conservarlas durante el transporte y almacenamiento, hasta su curtido.[21]

2.2.4 Principales Sistemas de Producción de Sal en México.

Existen diferentes métodos de producción de sal solar en México, los más utilizados son:

- **Salinas marinas**

Este método de producción abarca el 95% de sal solar producida en México y consiste básicamente en colocar agua de mar en estanques y proceder a evaporarla a través de la acción combinada de energía solar y viento. Cuando la salmuera alcanza su punto de saturación da inicio a la cristalización de cloruro de sodio; en este procedimiento podemos encontrar variantes como salinas que efectúan cristalización fraccionada, cristalización con salmueras no depuradas y salinas de tipo artesanal.

- **Producción de sal refinada al alto vacío**

Este proceso se lleva a cabo en una planta específicamente diseñada para este fin, consta esencialmente de evaporadores e intercambiadores de calor, también se le conoce como refinería. Una de las ventajas del proceso de producción de sal por medio de refinación es que se puede obtener sal muy cristalina, blanca, de alta

pureza (99.5%) y libre de materia extraña.

❖ **Sal en las cuencas endorreicas**

En México existen grandes áreas salinas ubicadas en el interior del país, sin embargo, actualmente estas explotaciones salineras, por el poco volumen de producción y por su calidad variable, han quedado limitadas a sus mercados locales y atienden a cierto tipo de consumo que no requiere sal de alta calidad (sales para forraje y curtiduría principalmente). Este tipo de explotación consiste generalmente en abrir pozos para aprovechar las salmueras subterráneas o tajos longitudinales para aprovechar afloramientos o depósitos superficiales de sal, se bombean las salmueras a vasos evaporadores donde se depositan las sales que cristalizan. La Figura 2.1 muestra gráficamente el consumo de sal de nuestro país a lo largo de 1994 a 1999.

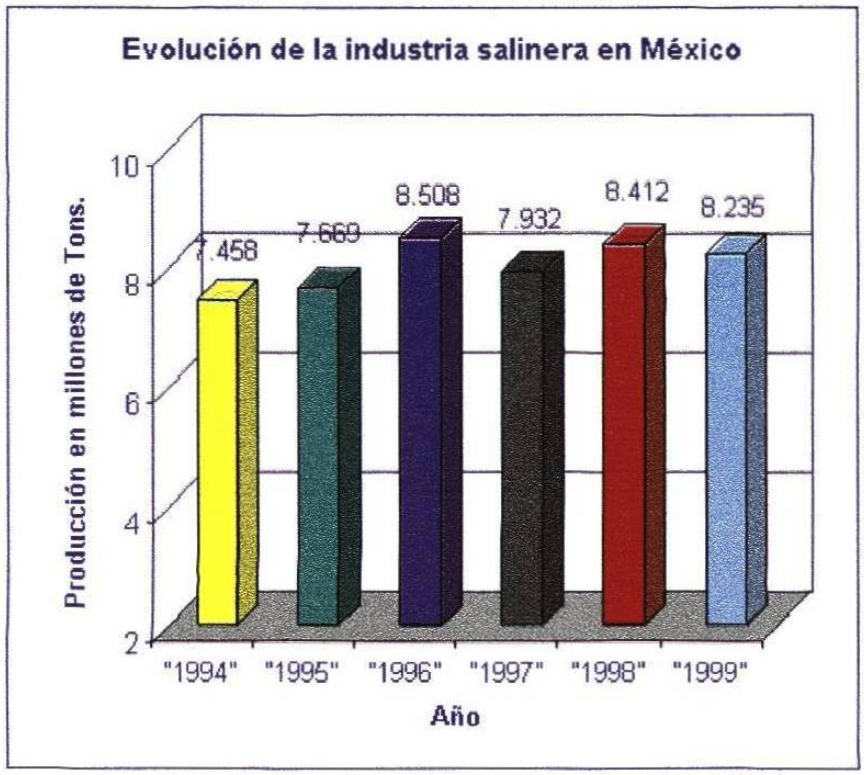

Figura 2.2 Consumo nacional anual de sal (NaCl) en el período de 1994 a 1999.

2.3 Objetivos del Trabajo

El objetivo de este trabajo es el de desarrollar la ingeniería básica para procesar un efluente salmuera proveniente de una planta papelera, con la finalidad de separar las sales disueltas mediante evaporación total desde la solución. El proceso propuesto evitará que deba buscarse la disposición de esa salmuera, acción que sería económicamente lesiva ya que los costos por disposición

serían muy elevados debido a las altas concentraciones salinas en el efluente.

Para lograr este propósito se adquirió una planta usada de evaporación, la cual deberá adaptarse a las necesidades de operación, buscando usar el total o la mayor parte de los equipos que lo componen.

2.3.1 Alcance del Trabajo

- Comprender el comportamiento de la salmuera al evaporarse.
- Desarrollar el balance de materia y energía.
- Elaborar el diagrama de flujo con las operaciones unitarias involucradas.
- Efectuar los cálculos para definir el tamaño de los equipos.

  Definir las operaciones paralelas o de servicio.
- Elaborar los diagramas de tuberías e instrumentos.
- Proporcionar información para el arreglo apropiado del equipo.

2.4 Volumen de Salmuera de este Caso Práctico

2.4.1 Bases de diseño

El flujo a procesar para fines de calculo es del orden de los 140 metros cúbicos de salmuera por día, y pensando a futuro se puede tener una capacidad de procesamiento de hasta 200 metros cúbicos por día, que es la máxima capacidad de la planta evaporadora, se toma en cuenta que al año se tienen 350 días de operación.

Del análisis químico de la salmuera se obtienen los siguientes datos en base al contenido iónico, que se presentan en la Tabla 2.1, además de una densidad de 1.1 expresada en kg por litro.

Por otra parte la salmuera analizada en base al contenido de sales, se muestra en la tabla 2.2, y nos da un total de 152.67 gr de sales disueltas por litro.

Ion	Contenido en gr/L
Sodio	50.9
Potasio	10.2
Sulfatos	14.4
Cloruros	47.8

Tabla 2.1, Análisis de la Salmuera en Base Ionica

Especie	Concentración en gr/L
NaCl	111.91
KCl	19.46
Na_2SO_4	21.30
H_2O	947.33

Tabla 2.2, Análisis de la Salmuera en Base al Contenido de Sales

Con lo anterior se deduce que el flujo de salmuera a evaporar será del orden de 9.559 toneladas por hora, con un contenido de sales en la salmuera diluida del orden de 14 %

La planta se diseñará a capacidad futura y únicamente las tuberías que manejan sólidos se dimensionarán a condiciones actuales para evitar sedimentación.

2.5 Proceso Propuesto

El principio de operación de este proceso consistirá en concentrar la salmuera al consumirse el agua por evaporación, hasta alcanzar por saturación su precipitación y cristalización, siendo las etapas involucradas en este proceso las siguientes:

Primero: el calor se transfiere del medio térmico hacia la salmuera. La transferencia generalmente sucede a través de una superficie sólida.

Segundo: la masa y el calor se transfieren simultáneamente desde el liquido (salmuera) hacia la fase vapor.

El proceso de evaporación es equivalente a una separación de una sola etapa. La etapa que controla el proceso es la transferencia de calor desde el calefactor a la salmuera.

El proceso propuesto permite la producción de sales de cloruro de sodio y potasio principalmente (NaCl y KCl), a partir del efluente salino de la planta, permitiendo con esto la integración en la búsqueda de una planta con "Cero Descargas".

El efluente se recibe bombeado desde la planta de tratamiento de aguas de la planta papelera y consiste en una salmuera al 10% (aproximado) en peso, con sales disueltas de cloruro de sodio (NaCl), cloruro de potasio (KCl) y sulfato de sodio (Na_2SO_4).

El producto final se obtendrá en forma de sales cristalizadas con un 3% de humedad, a las cuales se les buscará su posterior comercialización como sales de baja concentración en el mercado alimenticio de ganado (previa eliminación de los sulfatos presentes), o en aplicaciones similares.

El área de evaporación, además de brindar la oportunidad del aprovechamiento de este importante efluente, permite cumplir con las leyes y reglamentos ecológicos vigentes en nuestro Estado.

Con lo anterior se evitará disponer de esta salmuera cuyo contenido podría poner en grave riesgo tanto a cuerpos de agua, actuando como receptores, como a suelos.

El área de la planta de evaporación utilizará como materia prima el efluente salino proveniente de la planta papelera (salmuera diluida) y como servicios adicionales los siguientes materiales: vapor de agua, agua para las torres de enfriamiento, aditivos (inhibidores de corrosión), energía eléctrica, gas para la caldera y agua cruda.

2.5.1 Breve Descripción de los Experimentos en Laboratorio

Para el trabajo experimental se contó con un evaporador de triple efecto en el que se realizaron las mediciones típicas de temperatura, gradientes de temperatura, concentraciones en la alimentación y la descarga y otros parámetros útiles. Se dispuso también de un cristalizador de acero inoxidable donde se pudo regular la presión y la temperatura de trabajo, con lo que se buscó alcanzar los dos siguientes objetivos:

a) Validar Las Condiciones De Operación Calculadas Para Concentrar La Salmuera En Un Evaporador De Triple Efecto.

b) Obtener Cristales Como Producto De La Concentración De La Salmuera.

Para llevar a cabo dichos objetivos se trabajó en las instalaciones del CIQA en Saltillo, Coahuila, por ser las más adecuadas para dicho fin.

2.6 Resumen de los Objetivos del Trabajo

El objetivo del presente trabajo es lograr procesar una salmuera procedente de un sistema productivo industrial con la finalidad de separar las sales disueltas mediante la evaporación total del solvente (agua).

Se ha fijado como prioridad cumplir con la política de cero descargas y convertir los contaminantes del agua en productos comerciables, utilizando para este fin un equipo de evaporación de triple efecto.

El alcance de esta investigación y diseño abarca: Experimentación a nivel laboratorio, Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica, incluyendo un estudio de factibilidad para comercializar los productos obtenidos.

El estudio incluye obviamente el dimensionamiento, selección y diseño de equipos de transferencia de calor, como son evaporadores de triple efecto, calderas, bombas y condensadores a nivel laboratorio y planta.

2.7 Justificación del Proceso Propuesto

Las razones de índole sanitaria y ambiental expuestas en el primer capítulo, junto con las razones legales y económicas descritas en las secciones 2.2.1 y 2.2.2 justifican el proceso de concentración de la salmuera producida por la planta papelera.

La disposición directa de la salmuera al ambiente, suponiendo que eso fuese permitido, ocasionaría serios daños a suelos y cuerpos de agua. En el caso de los suelos, las sales NaCl y KCl causan cambios en las estructuras cristalinas de los minerales arcillosos que componen a los suelos y les modifican sus propiedades mecánicas y, lo que es más importante, sus características de retención de agua tornándolos en más áridos e inapropiados para la agricultura.

Los cuerpos de agua, superficiales o subterráneos, son también muy susceptibles a daños causados por descargas con altos contenidos en sales. El efecto puede ser adverso a comunidades biológicas o a individuos aislados, dependiendo

de la concentración de las descargas y del tamaño o caudal del cuerpo receptor.

Vale la pena señalar también los aspectos económicos involucrados en la directa disposición de la salmuera en comparación a las ventajas que ofrece su tratamiento.

No es posible la disposición directa de la salmuera a menos que se pague una cuota muy alta o bien a alguna compañía que ofrezca el confinamiento de este tipo de residuo. El precio depende del tipo y volumen del residuo, teniéndose en este caso que la erogación para la compañía papelera sería mensualmente del orden de $45,000, monto que se calcula a partir del caudal diario y el costo unitario de disposición.

La alternativa de un tratamiento como lo es el proceso propuesto, trae la ventaja de concentrar y recuperar a las sales para tornarlas en un producto con posibilidades de comercializar. El costo del tratamiento, según se demostrará adelante, es menor al costo de disposición directa. La comercialización de las sales trae adicionalmente un ingreso potencial a la planta papelera, tema que en sus bases es tratado en los párrafos siguientes.

CAPITULO 3

TRABAJO EXPERIMENTAL Y CÁLCULOS

En este capítulo se describe de manera detallada la experimentación llevada a cabo para obtener los parámetros de operación que permitirán el diseño a escala industrial.

Como primer paso se describen las Operaciones de Evaporación, Cristalización y Filtrado, así como las condiciones de operación apropiadas para la obtención de cristales de NaCl y KCl.

En la última parte se describen en detalle, los cálculos de diseño del sistema de evaporadores, junto con la operación de la planta de evaporación.

3.1 Generalidades

El efluente se recibe bombeado desde la planta de tratamiento de aguas de la planta papelera y éste se compone de una salmuera de aproximadamente 10% en peso que contiene predominantemente las sales disueltas de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl).

No sería apropiado disponer de la salmuera sin tratamiento previo, debido a su naturaleza y características, además de que económicamente puede aún ser aprovechada por sus constituyentes principales, NaCl y KCl. Para tal fin, se establecieron los siguientes objetivos: a) Concentrar la salmuera por evaporación y b) Cristalizar los componentes principales de ella.

Para llevar a cabo dichos objetivos se desarrolló el trabajo de validación experimental de las condiciones de las dos operaciones unitarias de que consiste este tratamiento de separación de sales. La investigación se efectuó en las instalaciones del Centro de Investigación de Química Aplicada (CIQA), en la Ciudad de Saltillo, Coahuila, por ser las más adecuadas para dicho fin.

Acerca del equipo empleado, se contó con un evaporador de triple efecto, en el que se realizaron las mediciones que normalmente se hacen en una planta real de evaporación. Se contó también con un cristalizador de acero inoxidable en donde se pueden regular las condiciones de presión y temperatura de trabajo, mismas que afectan a la cristalización.

3.2 Descripción de las Operaciones de Evaporación, Filtrado y Cristalización

3.2.1 Estabilización del Equipo Evaporador

a) Se siguió el manual de puesta en marcha del equipo evaporador.

b) Se regularon las condiciones de operación como temperatura, presión y flujos de alimentación y de condensado en todos los efectos, prestando suma importancia al nivel de condensado en cada efecto, a fin de lograr una operación segura del equipo de bombeo. La figura 3.1 muestra un diagrama esquemático del equipo evaporador.

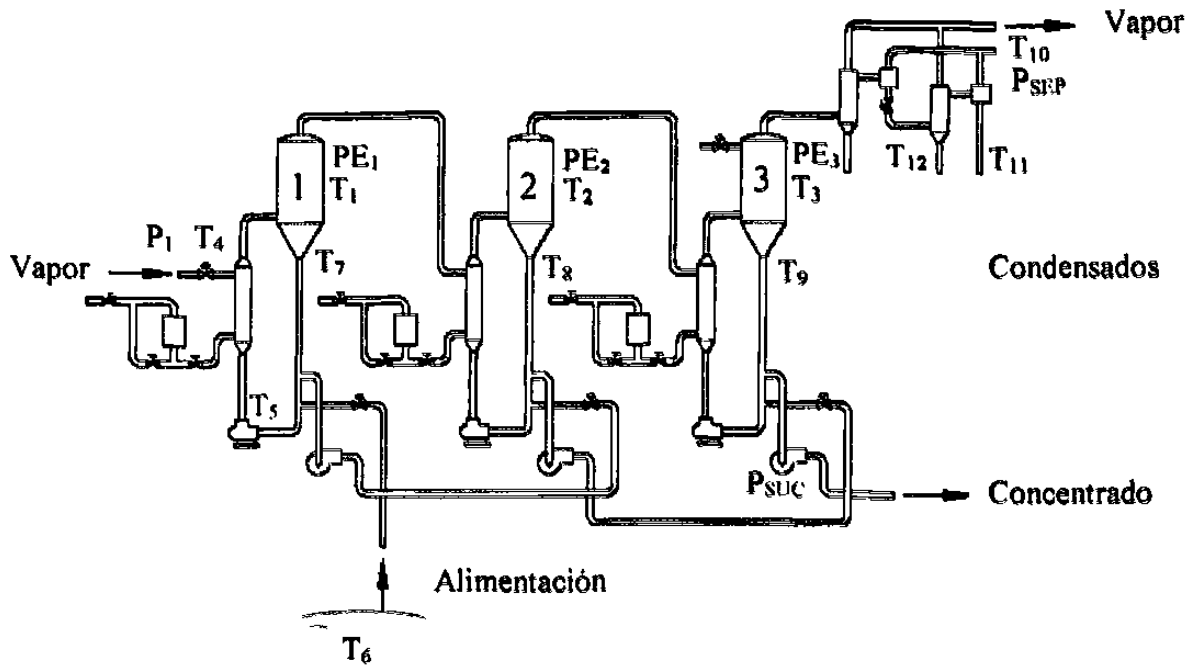

Figura 3.1 Esquema del evaporador de triple efecto utilizado.

3.2.2 Equipo de Cristalización y Filtración

a.-Carga del equipo

Se cargó el equipo de cristalización con 30 litros de salmuera concentrada obtenida del evaporador, ya que la capacidad del cristalizador es de 38 litros (10 galones) y, dependiendo del tiempo requerido para llevar a cabo la obtención del magma, se determinó el ritmo de trabajo.

b.-Medición de las condiciones

Se trabajó lo más cercanamente posible a las condiciones reales de operación, de presión y temperatura en el último efecto, de una planta evaporadora que trata salmueras de similares características a la de este proyecto.

c.-Obtención del producto

La salmuera concentrada obtenida, conocida también como magma, es una mezcla heterogénea de cristales y disolución saturada que, sometida a filtración para eliminar el exceso de la fase líquida, permite obtener los cristales de una forma más pura para su posterior análisis y comercialización.

3.3 Parámetros de Control en el Evaporador

Una vez logrado el estado estable en la operación del evaporador, se efectuaron con las mediciones de control que se indican, resumidas en la tabla 3.1 a continuación.

PRESIÓN	
Alimentación de vapor de la caldera	P_1
Efecto 1	PE_1
Efecto 2	PE_2
Efecto 3	PE_3
Separador	P_{SEP}
Succión	P_{SUC}
TEMPERATURA	
Vapor	
Efecto 1	T_1
Efecto 2	T_2
Efecto 3	T_3
Alimentación	T_4
Salmuera	
Precalentador	T_6
Inicial	T_6
Efecto 1	T_7
Efecto 2	T_8
Efecto 3	T_9
Agua de enfriamiento	
Entrada	T_{10}
Salida	T_{11}
Condensador	
Final	T_{12}
NIVELES	
Tanque de alimentación inicial	V_I
Tanque de alimentación final	V_F
Tanque de condensado	V_C
CALIDADES DE LOS CONDENSADOS (DENSIDAD, SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES)	
Vapores	
Condensado efecto 2	
Condensado efecto 3	
Salmuera	
Condensado efecto 1	
Condensado efecto 2	
Condensado efecto 3	

Tabla 3.1 Condiciones de Operacion Medidas Experimentalmente en las Diferentes Secciones del Equipo Evaporador.

En dicha tabla los datos son dados en referencia al diagrama esquemático mostrado en la figura 3.1.

Las mediciones se hicieron cada 15 minutos una vez alcanzado el estado estable. Se tomaron muestras de los condensados para su posterior análisis cualitativo y cuantitativo, de las sales presentes.

También se midieron los caudales o flujos en las diferentes líneas, las que básicamente son; alimentación de salmuera y alimentación de vapor (flujo de condensado).

3.4 Resumen de las "Corridas" Experimentales en el Evaporador

3.4.1 Primera "Corrida" Experimental: (Día 1°)

Se trabajó con un volumen inicial de 123 litros de salmuera diluida (densidad = 1.12 g/mL), mismo que podía ser repuesto en cualquier momento; se procedió durante 75 minutos tratando de estabilizar el sistema, obteniéndose las siguientes condiciones de operación:

EFECTO	TEMPERATURA DE VAPOR	TEMPERATURA SALMUERA	PRESIÓN MANOM.	PRESIÓN ABSOLUTA
1	102.0°C	52.4°C	9.2 "Hg	16.8 psia
2	70.0°C	80.0°C	-16.5 "Hg	4.2 psia
3	54.0°C	52.5°C	-19.7 "Hg	2.7 psia
ALIMENTACIÓN DE VAPOR	123.0°C		19.6 psia	31.8 psia

PRESIÓN ATMOSFÉRICA: 12.4 psia

A las 10:45 se detuvo la operación ya que falló la bomba de vacío y se procedió a cambiarla; a las 11:45 se terminó la reparación y se procedió a recuperar el nivel del tanque de alimentación de salmuera, hasta un volumen de 123 litros, trabajándose así hasta las 12:35 hrs. de manera estable. A las 13:00 hrs. comenzó a fallar la bomba de condensados y se suspendió la operación. Para este periodo se reportan los datos siguientes:

EFECTO	TEMPERATURA DE VAPOR	TEMPERATURA DE SALMUERA	PRESIÓN MANOM.	PRESIÓN ABSOLUTA
1	106.0°C	88.0°C	15.9 "Hg	20.2 psia
2	81.5°C	90.0°C	-5.0 "Hg	10.4 psia
3	67.5°C	75.0°C	-13.7 "Hg	5.6 psia
ALIMENTACIÓN DE VAPOR	124.0°C		18.7 psi	31.8 psia

PRESIÓN ATMOSFÉRICA: 12.4 psia

Se continuó la operación a las 15:30 hrs. y se trabajó hasta las 17:20 hrs., observándose las siguientes condiciones de operación:

EFECTO	TEMPERATURA DE VAPOR	TEMPERATURA SALMUERA	PRESIÓN MANOM.	PRESIÓN ABSOLUTA
1	109.0°C	65.4°C	16.8 "Hg	20.6 psia
2	73.0°C	81.4°C	-12.2 "Hg	6.3 psia
3	60.0°C	67.3°C	-18.6 "Hg	3.2 psia
ALIMENTACIÓN DE VAPOR	130.0°C		27.7 psi	40.0 psia

PRESIÓN ATMOSFÉRICA: 12.4 psia

Puede observarse que la temperatura en el efecto No. 3, no fue lo suficientemente alta, por lo cual no se alcanzó la evaporación de la salmuera. No se alcanzó la densidad final deseada de la salmuera (1.25 g/ml) ya que el tiempo de permanencia de la salmuera en el equipo fue muy corto, decidiéndose darle un mayor tiempo de permanencia en el sistema, en una posterior "corrida" experimental.

Durante el día se consumieron 62.8 litros de salmuera, y no se logró la completa estabilización del equipo. A las 17:20 hrs. se procedió a desalojar y lavar el equipo.

3.4.2 Segunda "Corrida" Experimental (Día 2)

Se trabajó con un volumen inicial de 123 L de salmuera diluida (densidad = 1.12 g/mL), el cual podía ser repuesto en cualquier momento; se trabajó durante 210 minutos, tratando de estabilizar el sistema hasta que el sello de aceite de la bomba de succión se contaminó con agua y al no haber succión en el segundo efecto la salmuera se saturó.

Se estuvo trabajando con un flujo de 0.5 Lpm de salmuera concentrada en el tercer efecto, registrándose una densidad de 1.30 g/mL que ocasionaba problemas en las tuberías por atascamiento de sólidos, por lo que se aumentó el flujo hasta 0.83 Lpm; ya con ésto se logró disminuir la densidad hasta 1.24 g/mL y el problema de atascamientos quedó resuelto. Por último, se trabajó con un flujo de 0.4 Lpm, registrándose una densidad de la salmuera estabilizada en 1.27 g/mL sin presentar un exceso de sólidos.

Resumen de operaciones:

- Tiempo de operación: 210 minutos.
- Volumen de salmuera concentrada: 104.4 litros
- Volumen de agua evaporada desde la salmuera: 97.6 litros
- Flujo promedio de concentrado: 0.5 Lpm

Condiciones de operación:

EFECTO	TEMPERATURA DE VAPOR	TEMPERATURA SALMUERA	PRESION MANOMÉTRICA	PRESION ABSOLUTA
1	101.3 °C	73.9°C	8.8 "Hg	16.6 psia
2	74.0 °C	81.5°C	-11.4 "Hg	6.7 psia
3	50.0 °C	62.0°C	-20.9 "Hg	2.1 psia
ALIMENTACION DE VAPOR	125.0 °C		20.7 psi	33.0 psia

PRESION ATMOSFERICA: 12.4 psia

El flujo de concentrado debió fijarse este día en 0.4 Lpm, pues un intento de disminución a 0.35 Lpm generó la indeseada cristalización prematura.

Se reanudó la operación a las 15:40 hrs. con un volumen de salmuera disponible de 61.5 litros; se trabajó por espacio de 60 minutos.

Resumen de operaciones:

- Tiempo de operación: 60 minutos.
- Volumen de Salmuera diluida tratada: 40 litros
- Volumen de salmuera concentrada: 25 litros
- Volumen de salmuera evaporada: 15.16 litros
- Flujo promedio de concentrado: 0.5 Lpm

Condiciones de operación:

EFECTO	TEMPERATURA DE VAPOR	TEMPERATURA SALMUERA	PRESION MANOMÉTRICA	PRESION ABSOLUTA
1	98.6°C	71.3°C	2.8 "Hg	13.7 psia
2	73.0°C	82.5°C	-12.0 "Hg	6.4 psia
3	53.7°C	64.2°C	-19.8 "Hg	2.6 psia
ALIMENTACION DE VAPOR	126.0°C		22.8 psi	35.0 psia

PRESION ATMOSFERICA: 12.4 psia

Al final de la corrida del día se alcanzó una concentración final de 1.26 g/mL, sin cristalización, como resultado de que el tiempo de permanencia de la salmuera en el equipo se incrementó. Sin embargo, hubo grandes variaciones en las presiones registradas en los tres efectos que componen al sistema de evaporación.

3.4.3 Tercera "Corrida" Experimental (Día 3°)

Se inició la operación del equipo con 123 litros de salmuera diluida disponible y se trabajó por espacio de 312 minutos, registrándose una densidad final de 1.25 g/mL y por momentos, de hasta 1.3 g/mL.

La siguiente tabla muestra el resumen de las condiciones de operación del tercer día.

EFECTO	TEMPERATURA DE VAPOR	TEMPERATURA SALMUERA	PRESION MANOMÉTRICA	PRESION ABSOLUTA
1	102.2°C	62.0°C	8.0 "Hg	16.3 psia
2	64.2°C	72.0°C	-16.5 "Hg	4.2 psia
3	42.0°C	50.0°C	23.6 "Hg	0.78 psia
ALIMENTACION DE VAPOR	127.0°C		22.7 psi	35.0 psia

PRESION ATMOSFERICA: 12.4 psia

Resumen de operaciones:

- Tiempo de operación: 312 minutos.
- Salmuera diluida total tratada: 208 litros (513.5 lb)
- Salmuera concentrada total: 108 litros (298 lb)
- Salmuera evaporada total: 94.0 litros (207.2 lb)
- Flujo promedio de concentrado: 0.5 Lpm
- Condensado total del Efecto No. 1: 77.2 lb
- Condensado total del efecto No. 2: 88.2 lb
- Condensado total del efecto No. 3: 55.1 lb
- Condensado total de vapor de caldera: 291 lb

NOTA: La temperatura registrada en la salmuera a la entrada del efecto No. 3, es superior a la temperatura de evaporación calculada para la salmuera en las condiciones de presión de vacío registrado en dicho efecto.

3.4.4 Cuarta "Corrida" Experimental (Día 4°)

Se trabajó con salmuera concentrada, con una densidad de 1.25 g/mL, cargando el cristalizador con 30 litros, equivalente a 82.67 lb (37.5kg).

Se inició la operación a las 10:00 hrs. y se trabajó a una temperatura de ebullición promedio de 96°C y a una presión de vacío de -7.8 "Hg hasta las 12:45 hrs. en que terminó la operación, registrándose una velocidad de evaporación de 4.181 litros por hora.

Resumen de operaciones:

- Tiempo de operación: 165 min.
- Salmuera total concentrada tratada: 30 L ó 37.5 kg (82.67 lb)
- Salmuera total evaporada: 11.5 L ó 11.5 kg (25.35 lb)
- Salmuera total saturada: 13.2 L o 16.5 kg (36.37 lb)
- Sales filtradas húmedas: 6.154 kg (13.56 lb)
- Sales filtradas secas: 5.325 kg (11.739 lb)
- Cristales precipitados en frío a partir de salmuera saturada:0.2616 kg (0.5767 lb)
- Pérdidas de vapor: 3.0 L ó 6.8 lb.

Después se trabajó con el cristalizador a presión atmosférica con el fin de obtener salmuera saturada de una manera más rápida, registrándose una temperatura de ebullición de 110°C, logrando procesar un total de 180 L de salmuera y obtener a partir de ésta, alrededor de 30kg de sales.

3.5 Conclusiones de la Experimentación

Al operar en estado estable se observó la importancia de que las velocidades de flujo en la alimentación y evaporación fuesen controladas rigurosamente, a fin de que tanto el solvente como el soluto no se acumularan ni disminuyeran en cada efecto.

Las variables: concentración, temperatura y velocidad de flujo, de la alimentación, son constantes y están determinadas según las características de la salmuera. Las presiones en la entrada de vapor vivo y el condensador son establecidas previamente y todos los niveles de las disoluciones se mantienen constantes en cada efecto. Por tanto, todas las concentraciones internas, las velocidades

de flujo, las presiones y las temperaturas se mantienen automáticamente constantes por sí mismas, durante la operación estable del proceso.

La fracción molar de sales en la salmuera concentrada solamente se puede modificar cambiando la velocidad de alimentación de la salmuera.

La concentración en el último efecto, y como consecuencia de la salmuera concentrada que se descarga del mismo, alcanzará eventualmente un nuevo estado estacionario para un nivel dado.

Es de suma importancia cuidar la relación de vacíos entre los diferentes efectos, para evitar que el producto deje de fluir. Las principales fallas o contratiempos observados fueron los taponamientos en tuberías por incrustaciones de sólidos, así como la falla de los sensores (solenoides) por ensuciamiento causado por las sales precipitadas, así como también las fallas en las diferentes bombas que manejan condensados pues se observó que había el riesgo de cavitación.

Fue evidente la necesidad de bombas de relevo o de sistemas para operar en "*by pass*", así como de mirillas en las diferentes líneas de alimentación de condensado.

3.6 Condiciones de Operación en la Evaporación de Triple Efecto

Por cada libra de vapor vivo alimentado se evaporaban alrededor de 0.85 lb de Salmuera, con lo que la concentración de las sales pasaba desde el 12% hasta el 25%.

Los siguientes datos muestran las condiciones en que fue operado el evaporador:

EFECTO	TEMPERATURA DEL VAPOR	TEMPERATURA SALMUERA	PRESION MANOMÉTRICA	PRESION ABSOLUTA
1	102.2°C	62.0°C	8.0 "Hg	16.3 psia
2	64.2°C	72.0°C	-16.5 "Hg	4.2 psia
3	42.0°C	50.0°C	-23.6 "Hg	0.78 psia
ALIMENTACION DE VAPOR	127.0°C		22.7 psi	35.0 psia

PRESION ATMOSFÉRICA: 12.4 psia

Las características del evaporador se resumen en la tabla 3.2, donde se muestra la eficiencia del mismo.

CAPACIDAD DEL EVAPORADOR	18.15 kg/hr	40.0 lb/hr
CONSUMO DE VAPOR VIVO	21.98 kg/hr	46.9 lb/hr
ECONOMÍA DEL EVAPORADOR	85.0%	

TABLA 3.2 Resumen de las Características del Evaporador

3.7 Condiciones de Operación durante la Obtención de Cristales

Para la obtención de cristales se utilizó el cristalizador, al que se le alimentaron 30 litros de salmuera concentrada, con una densidad de 1.25 g/mL, y se trabajó a una presión de vacío de -7.88 "Hg, con la cual la temperatura de ebullición de la salmuera es de 96°C.

La eficiencia del cristalizador se obtuvo a partir del porcentaje de sal recuperada desde la salmuera alimentada, dado que la sal contenida en la salmuera alimentada era de 9.37 kg y la sal recuperada en forma de salmuera fue de 5.58 kg, la recuperación fue de un 60%. En cuanto al volumen de salmuera evaporada (en % vol) fue del 40%.

3.8 Observaciones acerca de los Productos Obtenidos

3.8.1 Cristales

Después de analizar químicamente las sales obtenidas, se observó como principal componente, el NaCl en un 72.0%, seguido por el Na_2SO_4 con un 24.5% y por último el KCl con un 3.5%, confirmando lo observado al microscopio, donde eran predominantes las formas cúbicas e incoloras que corresponden al NaCl, pero había en una menor proporción formas monoclínicas e incoloras típicas del Na_2SO_4.

Los resultados resumidos del análisis químico realizado al producto obtenido se reportan en la tabla 3.3.

ELEMENTO	% Masa	P.M.
Na	39.73	23.0
K	2.11	39.1
SO_4	18.14	96.0
Cl	40.02	35.5

Tabla 3.3 Resumen de las Propiedades Químicas del Producto Obtenido

3.8.2 Salmueras

Los análisis químicos practicados a las salmueras obtenidas mostraron una tendencia ligeramente básica, registrando valores promedio de 8.0 a 8.5, lo que favorece la operación; ya que una salmuera ligeramente básica es menos corrosiva.

En la salmuera obtenida de los efectos de evaporación, la densidad se incrementó desde 1.12 g/mL hasta 1.25 g/mL y aquí es donde se observó que la saturación daba inicio, alcanzándose densidades intermedias en los efectos con valores de 1.15 g/mL y de 1.20 g/mL, pudiendo variar un poco estos valores pero siempre manteniendo el valor final de 1.25 g/mL.

Debido a que en las salmueras residuales de la prueba de la cristalización fue observada una tonalidad verde, se analizó el contenido de cobre presente, por ser este elemento el típico causante de esta coloración.

El análisis químico confirmó que efectivamente sí había cobre presente, en valores de hasta 10 mg por litro, pero un análisis de la salmuera original confirmó que ésta

no presentaba cobre, por lo que éste era producto de una contaminación proveniente del equipo cristalizador, o de sus tuberías durante la experimentación.

3.8.3 Condensados

Los condensados mostraron valores de densidad como era de esperarse, de 1.0 g/mL y valores de conductividad típicos de agua destilada, por lo que se descarta cualquier tipo de arrastre de sales durante la evaporación.

Estos vapores pueden considerarse típicos para un proceso de destilación, efectuado con un pH ligeramente básico.

3.8.4 Productos de la Filtración

Después de analizar las diferentes sales presentes en las salmueras, a través de los diferentes efectos, se observó que el contenido de NaCl y de KCl, expresado en partes por millón (mg por litro), se incrementó al llevar a cabo la filtración antes de la cristalización, mientras que

el contenido de Na_2SO_4 disminuyó, después de la filtración, y de la cristalización.

Lo anterior indica que una mayor parte del Na_2SO_4 es removido durante la filtración, por lo que el contenido de esta sal en la salmuera remanente, expresado en partes por millón, disminuye; mientras que nada de NaCl y KCl fueron retenidos en la etapa de la filtración realizada con papel filtro de velocidad media.

3.9 Economía del Evaporador

La capacidad del evaporador utilizado, en libras de salmuera evaporada por hora de operación, es de dada por el dato siguiente: 207.2 lb/312 minutos, ó 40 lb evaporadas por hora.

3.9.1 Consumo de Vapor Vivo

a) Cálculo del calor necesario para evaporar salmuera en el efecto No. 1:

$$q = m_f\ CP\ (T.\ SALIDA - T.\ ENTRADA) + (m_f - m)\ \lambda vap$$

donde;

m_f = masa de salmuera alimentada : **98.76 lb/hr**

CP = Capacidad calorífica de la salmuera : **0.80 Btu/lb°F**

T. SALIDA = Temperatura de evaporación de la salmuera: **215°F**

T. ENTRADA = Temperatura de salmuera al entrar al efecto: **143°F**

m = masa de salmuera concentrada : **58.911 lb/hr**

λvap = Entalpía de evaporación de la salmuera : **946 Btu/lb**

$$q = 98.76\ lb/hr * 1btu/(lb°F) * (215°F - 143°F) + (98.76\ lb/hr - 58.91\ lb/hr)*972\ Btu/lb$$

$$q = 44{,}432.49\ Btu/hr$$

b) Cálculo del consumo de vapor:

$$\text{Consumo de vapor} = q\ /\ \lambda vap$$

(44 432.49 Btu/hr)/946 Btu/lb = 46.96 lb/hr

Consumo total de vapor en 312 minutos: 244.23 lb

3.9.2 Economía

La economía es equivalente con la eficiencia del equipo intercambiador de calor, en este caso el evaporador de triple efecto. La definición de la economía es:

(lb de salmuera evaporada)/(lb de vapor vivo alimentado)x 100

(207.2 lb/244.23 lb)*100 = 85.0%

3.10 Criterios para Definir el Proceso

Se tomó la decisión de operar el sistema de evaporación a flujo en contracorriente, con el objetivo de mejorar la eficiencia en el uso del vapor de la caldera.

Los calefactores fueron adquiridos con tubos de 2 pulgadas y se evaluó la posibilidad de instalarlos como calefactores de uno, dos o tres pasos, resultando la mejor opción la de dos pasos, ya que se tiene un flujo de recirculación moderado, junto con una diferencia de

temperatura adecuada, con la ventaja adicional de que se reduce el rompimiento de cristales, en comparación con el cambiador de tres pasos. Ello obligó a acomodar los tres calefactores de forma horizontal sólo para el efecto No.3.

La velocidad seleccionada de recirculación en los calefactores es mínima (5 ft/seg); con ésto se asegura evitar la sedimentación de sólidos en los tubos y se obtiene además, un alto coeficiente de transferencia de calor.

Se pretende alcanzar una distribución de temperaturas y presiones óptimas en el evaporador de triple efecto, mediante el uso de vapor saturado en el primer efecto y un condensador barométrico con sistema de bomba de vacío.

Debido a que la salmuera contiene una mezcla de sales y no se tiene ninguna referencia en cuanto al tamaño del cristal a obtener, se incluyó un asentador para dar oportunidad de sedimentar los cristales y amortiguar las variaciones entre la producción y la separación de las sales. En base al mismo razonamiento anterior, el tercer efecto se diseñó como evaporador-cristalizador.