

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**“PROPUESTA DE SEGREGACIÓN DE CORRIENTES DE AGUA
PARA SU REÚSO Y RECICLAJE
DENTRO DE UNA INDUSTRIA DE GALVANIZADO:
CASO NOVACERO S.A.”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

SALAZAR BRITO KATHERINE SILVANA

katherine.salazar@epn.edu.ec

DIRECTOR: DRA. CRISTINA ALEJANDRA VILLAMAR AYALA

cristina.villamar@usach.cl

CO-DIRECTOR: MSc. NATHALIA TERESA VALENCIA BONILLA

nathalia.valencia@epn.edu.ec

Quito, julio 2018

DECLARACIÓN

Yo, Salazar Brito Katherine Silvana, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

KATHERINE SILVANA SALAZAR BRITO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Salazar Brito Katherine Silvana, bajo mi supervisión.

Dra. CRISTINA VILLAMAR
DIRECTOR DEL PROYECTO

MSc. NATHALIA VALENCIA
CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, principal hacedor en mi vida. Su amor y misericordia me acompañaron en todo momento dentro y fuera de mi vida estudiantil.

A mis padres, fortaleza y pilar en mi vida. Quienes, por su amor y apoyo incondicional se convirtieron en mi mayor inspiración para alcanzar esta meta. A mi madre, por su entrega y dedicación. A mi padre, por su esfuerzo y sabiduría.

Mi sincera gratitud y admiración a la Dra. Alejandra Villamar por su orientación, paciencia, motivación, entusiasmo e inmenso conocimiento en la realización de este proyecto.

A la MSc. Nathalia Valencia, sin su apoyo y colaboración este trabajo coordinado no hubiera sido posible.

Mi reconocimiento a la empresa NOVACERO S.A., por facilitar los medios logísticos y económicos, así como el apoyo y confianza para el desarrollo del trabajo. Hago extensiva mi gratitud al departamento de Control de Calidad, quienes tuvieron una participación activa y desinteresada en este trabajo.

A la Universidad de Santiago de Chile, entidad a la pertenece la Dra. Alejandra Villamar, por su apoyo internacional mediante la cooperación con el direccionamiento de este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres, mis motivaciones, mis razones, con mucho amor y cariño.

A mi mejor amigo, confidente, consejero y cómplice de aventuras, por tu constante motivación, apoyo y entrega en los momentos de declive.

A mis hermanos y familia.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS	XIX
RESUMEN	XXI
ABSTRACT.....	XXIII
PRESENTACIÓN.....	XXV
INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. ALCANCE	4
MARCO TEÓRICO	6
2.1. PROCESO DE GALVANIZADO	6
2.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE GALVANIZADO.....	7
2.2. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL GALVANIZADO	9
2.2.1. GENERACIÓN DE CORRIENTES RESIDUALES	9

2.2.1.1.	Residuos líquidos.....	9
2.2.1.2.	Residuos sólidos y semisólidos.....	9
2.2.1.3.	Emisiones atmosféricas	10
2.2.2.	IMPACTOS AMBIENTALES	10
2.3.	TRATAMIENTO DE los RESIDUOS LÍQUIDOS DEL GALVANIZADO	11
2.3.1.	OPERACIONES UNITARIAS UTILIZADAS EN TRATAMIENTO.....	13
2.3.1.1.	Homogenización del caudal	13
2.3.1.2.	Sedimentación	13
2.3.1.3.	Mezclado.....	13
2.3.1.4.	Precipitación química	14
2.3.1.5.	Coagulación y floculación.....	14
2.3.1.6.	Filtración	15
2.3.1.7.	Neutralización del pH	16
2.4.	ESTRATEGIAS DE REÚSO Y RECICLAJE DE CORRIENTES LIQUIDAS PROCEDENTES DEL PROCESO PRODUCTIVO DE GALVANIZADO	18
2.4.1.	GENERALIDADES DEL REÚSO Y RECICLAJE DE RESIDUOS LÍQUIDOS	18
2.4.1.1.	Reúso, regeneración-reúso, regeneración-reciclaje de corrientes líquidas	18
2.4.2.	CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL	20
2.4.2.1.	Balance de materia	20
2.4.3.	METODOLOGÍA WATER PINCH	21
2.4.3.1.	Operaciones con transferencia de masa	22
2.4.3.2.	Balance de contaminantes transferidos al agua	22
2.4.3.3.	Curva Compuesta de Concentraciones.....	25
2.4.3.4.	Configuración de la red de corrientes líquidas.....	27

2.4.4.	ÍNDICE DE SEGREGACIÓN (Sindex).....	28
2.4.4.1.	Carga contaminante	29
	METODOLOGÍA	30
3.1.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	30
3.1.1.	PLANTA INDUSTRIAL DE GALVANIZADO	30
3.1.2.	PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS INDUSTRIALES LÍQUIDOS	31
3.2.	CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL.....	32
3.2.1.	MONITOREO, MUESTREO Y ANÁLISIS ANALÍTICO.....	32
3.2.1.1.	Muestreo de los residuos líquidos y sólidos	32
3.2.1.2.	Ubicación de los puntos de muestreo.....	33
3.2.1.3.	Identificación de las corrientes líquidas	35
3.2.1.4.	Caracterización de las corrientes líquidas	36
3.2.1.5.	Monitoreo de caudales de las corrientes líquidas	37
3.2.1.6.	Evaluación de la Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos.....	38
3.2.1.7.	Identificación de los residuos sólidos y semisólidos	38
3.2.1.8.	Caracterización de los residuos sólidos y semisólidos	39
3.2.2.	BALANCE DE MATERIA	39
3.2.2.1.	Balance de materia por fase de producción	41
3.2.2.2.	Balance de materia general	41
3.3.	APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	42
3.3.1.	METODOLOGÍA WATER PINCH	42
3.3.1.1.	Curva Compuesta de Concentraciones.....	42
3.3.1.2.	Configuración de la red de residuos líquidos.....	44
3.3.2.	ÍNDICE DE SEGREGACIÓN (Sindex).....	45
3.3.2.1.	Aplicación del Sindex	45

3.3.2.2.	Tratamiento diferenciado de los influentes de la Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos	46
3.4.	ESCENARIOS PARA EL MODELAMIENTO DE LA RED DE CORRIENTES LÍQUIDAS	47
3.4.1.	PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS	47
3.4.1.1.	Escenario I: Flujo mínimo de agua	47
3.4.1.2.	Escenario II: Tratamiento diferenciado de residuos líquidos	47
3.4.1.3.	Escenario III: Flujo mínimo de agua y tratamiento diferenciado de residuos líquidos	48
3.4.2.	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS	48
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1.	CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL	50
4.1.1.	BALANCE DE MATERIA POR FASE DE PRODUCCIÓN	50
4.1.1.1.	Desengrase	50
4.1.1.2.	Decapado	51
4.1.1.3.	Fluxado o fundente	53
4.1.1.4.	Recubrimiento metálico	53
4.1.2.	BALANCE DE MATERIA GLOBAL	54
4.1.2.1.	Consumo de productos químicos	55
4.1.2.2.	Consumo de agua fresca	56
4.1.2.3.	Generación de residuos líquidos	57
4.1.2.4.	Generación de residuos sólidos y semisólidos	58
4.1.3.	PUNTOS CRÍTICOS DEL PROCESO DE GALVANIZADO	59
4.1.4.	CARACTERIZACIÓN DE LAS CORRIENTES LÍQUIDAS	60
4.1.4.1.	Caudales de las fases de producción	60
4.1.4.2.	Análisis de los parámetros de las corrientes líquidas del proceso	61

4.1.5.	CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y SEMISÓLIDOS	68
4.1.5.1.	Análisis de los parámetros de caracterización de los residuos semisólidos	68
4.1.5.2.	Análisis de los parámetros de caracterización de los residuos sólidos.....	70
4.2.	MODELOS MATEMÁTICOS DE SEGREGACIÓN, REÚSO Y RECICLAJE DE AGUA	70
4.2.1.	METODOLOGÍA WATER PINCH	70
4.2.1.1.	Curva Compuesta de Concentraciones.....	72
4.2.1.2.	Configuración de la red de residuos líquidos para un contaminante único	75
4.2.2.	ÍNDICE DE SEGREGACIÓN (Sindex).....	76
4.2.2.1.	Análisis de las corrientes según el Sindex	76
4.2.2.2.	Evaluación de la Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos.....	85
4.2.2.3.	Tratamiento diferenciado de los influentes de la Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos	87
4.3.	ESCENARIOS PLANTEADOS PARA LA CONFIGURACIÓN DE LA RED de corrientes líquidas	89
4.3.1.	ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS	89
4.3.1.1.	Escenario actual.....	89
4.3.1.2.	Escenario I: Flujo mínimo de agua	90
4.3.1.3.	Escenario II: Tratamiento diferenciado de residuos líquidos.....	92
4.3.1.4.	Escenario III: Flujo mínimo de agua y tratamiento diferenciado de los residuos líquidos.....	92
4.3.2.	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS	94
4.3.3.	SELECCIÓN DEL ESCENARIO ÓPTIMO	96
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97

5.1. CONCLUSIONES	97
5.2. RECOMENDACIONES	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS	111
ANEXO No. 1	112
ANEXO No. 2	119
ANEXO No. 3	124
ANEXO No. 4	129

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 Fases del proceso de galvanizado en caliente	7
TABLA 2.2 Residuos sólidos procedentes del proceso de galvanizado.....	10
TABLA 2.3 Etapas involucradas en el tratamiento de residuos líquidos	12
TABLA 3.1 Criterios considerados para el muestreo	33
TABLA 3.2 Identificación de las corrientes líquidas del proceso	35
TABLA 3.3 Parámetros físico-químicos analizados para caracterizar las corrientes líquidas del proceso	36
TABLA 3.4 Identificación de los residuos sólidos y semisólidos generados.....	38
TABLA 3.5 Parámetros físico-químicos analizados para caracterizar los residuos semisólidos del proceso.....	39
TABLA 3.6 Etapas para el análisis de entradas y salidas del proceso.....	40
TABLA 4.1 Consumo de productos químicos por fase (en kg/t _{ag}).....	55
TABLA 4.2 Consumo de agua por fase (en kg/t _{ag}).....	56
TABLA 4.3 Generación de residuo líquido por fase (en kg/t _{ag})	57
TABLA 4.4 Generación de residuos sólidos por fase (en kg/t _{ag})	58
TABLA 4.5 Flujos de agua de las corrientes líquidas del proceso	61

TABLA 4.6 Concentración de los componentes de las corrientes líquidas del proceso	62
TABLA 4.7 Cargas contaminantes de las fases del proceso	67
TABLA 4.8 Caracterización físico-química de los lodos procedentes del proceso	69
TABLA 4.9 Caracterización de los residuos siderúrgicos	70
TABLA 4.10 Valores límites del proceso de galvanizado.....	72
TABLA 4.11 Comparación de resultados Sindex según el tipo de contaminante	80
TABLA 4.12 Análisis del requerimiento de tratamiento por tipo de corriente y contaminante	81
TABLA 4.13 Parámetros evaluados en las tecnologías de tratamiento de los efluentes galvánicos.....	86
TABLA 4.14 Criterios de tratabilidad de las operaciones unitarias de la PT-RILes	87
TABLA 4.15 Segregación de corrientes en función de la carga y tratamiento	89
TABLA 4.16 Comparación entre los escenarios propuestos.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Diagrama de flujo del proceso de galvanizado.....	8
FIGURA 2.2 Impactos ambientales del proceso de galvanizado	11
FIGURA 2.3 Eficiencias de eliminación para residuos líquidos industriales	17
FIGURA 2.4 Estrategias de reúso y reciclaje de corrientes para minimizar la generación de residuos líquidos	20
FIGURA 2.5 Diagrama de bloque del intercambio de masa	22
FIGURA 2.6 Modelo de la estructura general de una operación con reúso de residuos líquidos	23
FIGURA 2.7 Modelo de la estructura general de una operación con regeneración-reciclaje del agua	25
FIGURA 2.8 Diagrama de la Curva Compuesta de Concentraciones	26
FIGURA 2.9 Cuadrícula de diseño para la configuración de la red de agua.....	28
FIGURA 3.1 Mapa de ubicación de la zona de estudio	30
FIGURA 3.2 Esquema simplificado la secuencia del proceso de galvanizado	31
FIGURA 3.3 Esquema simplificado de la PT-RILes	32
FIGURA 3.4 Puntos de muestreo de residuos líquidos y semisólidos (lodo)	34
FIGURA 4.1 Flujo de materia por unidad productiva (t_{ag}) en la fase de desengrase	52

FIGURA 4.2 Flujo de materia por unidad productiva (t_{ag}) de la fase de decapado	52
FIGURA 4.3 Flujo de materia por unidad productiva (t_{ag}) de la fase de fluxado	53
FIGURA 4.4 Flujo de materia por unidad productiva (t_{ag}) en la fase de recubrimiento metálico	54
FIGURA 4.5 Flujo de materia proceso de galvanizado.....	55
FIGURA 4.6 Consumo de productos químicos por fase (en %)	56
FIGURA 4.7 Consumo de agua por fase (en %)	57
FIGURA 4.8 Generación de residuo líquido por fase (en %)	58
FIGURA 4.9 Generación residuos/ subproductos sólidos por fase (en %)	59
FIGURA 4.10 Distribución del consumo de agua y productos químicos, y la generación de residuos entre fases de producción	60
FIGURA 4.11 Fases que consumen agua en el sistema actual de la red de corrientes líquidas de la planta de galvanizado	71
FIGURA 4.12 Curva Compuesta de Concentraciones para SFT.....	73
FIGURA 4.13 Curva Compuesta de Concentraciones del Zn.....	74
FIGURA 4.14 Curva Compuesta de Concentraciones de la DQO.....	74
FIGURA 4.15 Configuración de la red de residuos líquidos considerando a los SFT como un contaminante único	76
FIGURA 4.16 Segregación de corrientes utilizando el Sindex para la fase de enjuague del desengrase	77

FIGURA 4.17 Segregación de corrientes utilizando el <i>Sindex</i> para la fase de decapado agotado	77
FIGURA 4.18 Segregación de corrientes utilizando el <i>Sindex</i> para la fase de enjuague 1	78
FIGURA 4.19 Segregación de corrientes utilizando el <i>Sindex</i> para la fase de enjuague 2	78
FIGURA 4.20 Segregación de corrientes utilizando el <i>Sindex</i> para la fase de enfriamiento	79
FIGURA 4.21 Segregación de corrientes utilizando el <i>Sindex</i> para el caldero	79
FIGURA 4.22 Posible segregación de las corrientes utilizando el <i>Sindex</i>	84
FIGURA 4.23 Escenario actual de la red de corrientes líquidas	90
FIGURA 4.24 Escenario I para la configuración de la red de corrientes líquidas	91
FIGURA 4.25 Escenario II para la configuración de la red de corrientes líquidas	93
FIGURA 4.26 Escenario III para la configuración de la red de agua	94
FIGURA 4.27 Comparación entre los escenarios propuestos	96

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

A y G	Aceites y grasas
SFT	Sólidos Filtrables Totales
SST	Sólidos Suspendidos Totales
ST	Sólidos Totales
SAAM	Sustancias Activas al Azul de Metileno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
Cl⁻	Cloruros
NH₄⁺	Amonio
CE	Conductividad Eléctrica
F_i	Caudal de agua fresca que ingresa en la operación i.
X_{i,j}	Caudal de residuo líquido de la operación j reusado en la operación i.
W_i	Caudal de residuo líquido de desecho de la operación i.
X_{j,i}	Caudal de residuo líquido de la operación i reusada en la operación j.
C_{j,sal}	Concentración a la salida de la operación j
C_{i,sal}	Concentración a la salida del agua posterior a la operación i
Δm_i	Carga másica total de contaminante transferido desde la operación i
C_{i,ent}	Concentración promedio a la entrada de la operación i.
C_{i,ent}^{máx}	Concentración máxima de entrada de la operación i.
C_{i,sal}^{máx}	Concentración máxima de salida de la operación i.
X_{r,i}	Caudal de agua de la operación i conducido hacia la regeneración.
X_{i,r}	Caudal de agua de la operación i procedente de la regeneración.
f_{i,min}	Caudal mínimo de agua fresca necesaria para la fase i.

f_{\min}	Caudal mínimo de agua fresca necesario para el proceso.
Δm_{pinch}	Transferencia de masa en el punto <i>Pinch</i> .
C_{pinch}	Concentración del contaminante en el punto <i>Pinch</i> .
S_{index}	Índice de Segregación
PT-RILes	Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos

RESUMEN

Actualmente, el galvanizado por inmersión en caliente es el método más utilizado para mejorar la resistencia del acero a la corrosión. Este proceso, se caracteriza por elevadas tasas de consumo de materias primas, energía y principalmente agua. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue proponer alternativas de segregación de corrientes líquidas para su reúso y reciclaje dentro de la industria.

Para este propósito, se desarrollaron tres modelos matemáticos secuenciales asociados con la optimización de la disposición de la red de corrientes líquidas. El procedimiento involucró inicialmente la caracterización ambiental del proceso determinándose los flujos de materia (entradas/salidas) de cada fase productiva. El volumen mínimo de agua dulce que requiere el proceso se definió mediante el método gráfico *Water Pinch* considerando 4 fases de enjuague y 3 contaminantes individuales: SFT, Zn y DQO. Simultáneamente, el tipo de tratamiento para los residuos líquidos se evaluó mediante el análisis *Sindex* (% carga - % flujo) relacionado al contenido de carga orgánica, inorgánica e híbrida, bajo 2 escenarios. Por último, de acuerdo a los métodos propuestos se formularon tres escenarios posibles para la configuración de la red de corrientes líquidas.

Los resultados del balance de materia indicaron, que el agua fresca se consume principalmente en las fases de enjuague (2,4 m³/t acero galvanizado), correspondientes al 95% de la demanda total de agua. La estrategia de reúso de residuos líquidos estimó un flujo mínimo de agua fresca cercano a 1,8 m³/h (SFT como contaminante único) con lo cual la cantidad de agua fresca disminuyó en un 38% (2,9 m³/h a 1,8 m³/h). El desvío de residuos líquidos de baja carga ($S_{index} < 0$) a unidades intermedias de tratamiento disminuyó en un 15% los consumos de insumos necesarios para su regeneración.

La más eficiente configuración de red líquida propuesta fue el escenario obtenido mediante segregación (*Sindex*) y reúso/reciclaje de residuos líquidos (*Pinch*). Este escenario, permitió un ahorro por costos de tratamiento del 41% evitando la emisión

de 16,5 kg CO_{2eq}/día por gasto energético (663,5 kWh/mes). Además, la potencial aplicación del escenario óptimo traería beneficios ambientales (39,5% insumos y 37,3% agua fresca no consumidos) y económicos (38,1% gasto energético evitado) para la empresa.

Palabras clave: Galvanizado en caliente, segregación de corrientes, reúso/reciclaje, *Water Pinch*, *Sindex*.

ABSTRACT

Currently, hot dip galvanizing is the most used method to improve the resistance of steel against corrosion. This process is characterized by high rate of consumption of raw materials, energy and mainly water. Therefore, the aim of this work was to propose water segregation alternatives for reusing and recycling within this industry.

For this purpose, three sequential mathematical models were developed, which were associated with the water network optimization (fresh water and wastewater). The procedure initially involved the processes environmental characterization, estimating matter flows (inputs/outputs) of each productive phase. The minimum volume of required fresh water was defined by the *Water Pinch* graphic method, where 4 rinsing phases and 3 individual pollutants (TFS, Zn and COD) were considered. Simultaneously, the wastewater treatment type was evaluated through the *Sindex* (% load - % flow), considering 2 scenarios with classified pollutants as organics, inorganic and hybrids. Finally, three possible scenarios for the configuration of water network were formulated.

Results showed that the main consumption of fresh water was in the rising phases with a value of around 2.4 m³/t of galvanized steel, which represents 95% of all the fresh water consumed. The wastewater reuse strategy restricted fresh water flows at values close to 1.8 m³/h (TDS as single pollutant), decreasing it by 38.4% (2.9 m³/h to 1.8 m³/h). Deviating the wastewater low-load ($S_{index} < 0$) toward intermediate treatment units reduced the supplies consumption used within treatment by around 15%. The most efficient water network was the scenario obtained by segregation (*Sindex*) and wastewaters reuse/recycling (*Pinch*). This scenario allowed 41% of savings for treatment costs, and 16.5 kg CO₂eq/day of indirect emissions by energy consumption from treatment (663.5 kWh/month).

In addition, the potential application of the optimal scenario will result in environmental benefits (39.5% consumptions and 37.3% fresh water not consumed) and economic benefits (38.1% avoided energy consumption) for the galvanizing company.

Keywords: hot dip galvanized, water network, reuse/recycling, *Water Pinch*, *Sindex*.

PRESENTACIÓN

El presente estudio constituye una propuesta de segregación de corrientes líquidas encaminadas hacia su reúso y reciclaje, dentro de una planta de galvanizado. El trabajo, integra 5 capítulos detallados a continuación.

El **Capítulo I** expone una breve introducción al tema, contemplando los antecedentes, justificación, alcance y objetivos propuestos en este estudio.

El **Capítulo II** desarrolla el marco teórico correspondiente al proyecto, para lo cual se abordan temas como el proceso de galvanizado, sus efectos ambientales y las operaciones unitarias frecuentemente utilizadas para la regeneración de los residuos líquidos galvánicos. Además presenta la descripción de las metodologías seleccionadas, es decir, teoría de segregación *Sindex* y reúso/reciclaje o *Pinch* y sus aplicaciones en la industria.

El **Capítulo III** presenta la metodología utilizada para la caracterización ambiental del proceso de galvanizando y para la segregación de corrientes, abordando los criterios metodológicos considerados en la aplicación del método *Water Pinch* y *Sindex* (Índice de Segregación).

El **Capítulo VI** expone los resultados obtenidos y propone diferentes escenarios para el diseño de la red de corrientes líquidas de la planta evaluada.

Finalmente, el **Capítulo V** presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas con el desarrollo del trabajo.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

De acuerdo con la Asociación Internacional del Zinc (IZA) a nivel global se consumen más de 11 millones de toneladas de Zn/año, de las cuales la mitad se dirige a actividades de galvanizado (Ajersch et al., 2005; IZA, 2010).

La industria de galvanizado emplea finas películas de zinc (5-125 μm) para el recubrimiento del acero o del hierro fundido, por medio de un proceso de sumersión (Delvasto et al., 2012). Tradicionalmente, el galvanizado se ha considerado como un sistema de protección anticorrosivo o como un método de refuerzo que preserva las propiedades mecánicas del metal base (Bao et al., 2016, Pokorný et al., 2017; Suárez et al., 2014).

En el Ecuador, existen cerca de 8.020 empresas que pertenecen al sector metalmeccánico (FLACSO-MIPRO, 2012). Dicha actividad productiva, alcanza una producción entre 0,9 a 1,3 millones de toneladas acero/año (PRO Ecuador, 2013). Alrededor de 0,7 millones de toneladas/año de esta producción, corresponden a la elaboración de artículos de acero (varillas, perfiles, tubos, alambres y productos varios) (PRO Ecuador, 2016).

A nivel industrial, el proceso de galvanizado se ha caracterizado por ser uno de los grandes consumidores de materias primas (72-75 kg Zn /t productiva, > 30 kg aditivos/t acero galvanizado) y recursos (300-900 kWh/t producto, < 3 m³ agua/t producto) (CE, 2006; Kong y White, 2010). Lo que ocasiona una generación de residuos líquidos de 0,4 a 3 m³ agua/t producto (Kong y White, 2010; Tahir y Rauf, 2004). Para disminuir la descarga de contaminantes procedentes del proceso y el consumo hídrico, se requiere optimizar el diseño de las redes de agua para reusar con o sin regeneración y además reciclar los residuos líquidos generados (Mehrdadi et al., 2009; Mohammadnejad et al., 2012).

Dentro de las prácticas eficientes para el uso del recurso agua, está el optimizar la cantidad de agua limpia necesaria y cuando ésta es utilizada, reusarla para procesos productivos distintos de donde procede o reciclarla una vez regenerada en el mismo proceso o fase de producción (Wang y Smith, 1994; González et al., 2004). Para establecer la manera más eficiente de optimización, existen varias herramientas, tales como: diagramas fuente-sumidero, optimización matemática mediante programación lineal o no lineal, análisis cascada de agua, *Sindex* (Índice de Segregación), análisis *Water Pinch* (concentración óptima de flujos), entre otros (Hu et al., 2011; Priya y Bandyopadhyay, 2017). La dos últimas herramientas son las más utilizadas en el ámbito industrial y científico (El-Halwagi y Sheley, 2000).

La metodología *Water Pinch* es un método sistemático integrador de procesos, que analiza configuraciones de redes de agua para disminuir su consumo (Rašković, 2010; Wan Alwi y Manan, 2013). Wang y Smith (1994) desarrollaron un método gráfico para diseñar un sistema de distribución de agua que ofrece un reúso/reciclaje máximo de agua con/sin regeneración de efluentes (Alva-Argáez et al., 2007). Mientras que, el *Sindex* (Índice de Segregación) es una herramienta de fácil implementación que permite detectar oportunidades de separación y agrupación de corrientes (Villamar et al., 2014; Rašković, 2010). Su análisis se basa en la contribución porcentual un parámetro contaminante en particular respecto a la descarga total (Rivera et al., 2007).

Previo a cualquier análisis de corrientes de agua, es necesario determinar un inventario de la información que permita caracterizar ambientalmente el proceso (balance de materia) (Rivera et al., 2007). Con la información obtenida, es posible identificar la cantidad de agua utilizada y además relacionar su calidad con los procesos a los que puede verse sometida (consumo de insumos, recursos, entre otros) (Mann y Liu, 1999).

A nivel de la industria del galvanizado, varios autores han reportado el uso de prácticas de producción más limpia (PML) para minimizar el consumo de agua (Fresner et al., 2007; Ríos et al., 2011). PML se entiende como una estrategia preventiva para disminuir unidades de contaminación por unidad de producción

(Pitty, 2001). Algunas, estrategias en este rubro, han estado enfocadas al reúso de los enjuagues, disminuir el arrastre entre baños, técnicas de recuperación y reciclado de sustancias, entre otros. Este tipo de estrategias han permitido disminuir el consumo de agua fresca en un rango que fluctúa entre el 15 a 50% (Ríos et al., 2011; ASIMET y CPL, 2014; Fresner et al., 2007).

No obstante, la efectividad de dichas estrategias depende de la optimización de las mismas, buscando cual o cuales se ajustan y son más efectivas para una industria específica. En definitiva, la aplicación de PML requiere de un análisis previo, que las estrategias antes mencionadas pueden visibilizar.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer una propuesta de segregación de corrientes de agua de proceso de galvanizado, para su reúso y reciclaje dentro de esta industria, a través de los modelos matemáticos *Water Pinch* y *Sindex*.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los índices de generación de las aguas residuales y de lodos en la industria de galvanizado, a través de una caracterización ambiental, con la finalidad de identificar puntos críticos del proceso productivo.
- Identificar las oportunidades de minimización de consumo de agua fresca, generación de agua residual y de segregación de agua en esta actividad productiva, a través de la aplicación de la metodología *Water Pinch* y *Sindex*, para maximizar la reutilización y recirculación de las aguas de proceso.
- Establecer posibles escenarios de la red de agua industrial, utilizando los resultados de los métodos aplicados, para identificar la configuración óptima de la misma.

1.3. JUSTIFICACIÓN

A nivel industrial, los impactos ambientales generados por el proceso de galvanizado son controlados por medidas correctivas de tratamiento *end of pipe* o “al final de la tubería”. En consecuencia, dentro de esta práctica no es común evaluar estrategias que disminuyan y optimicen el uso y consumo de recursos como el agua, energía y materias primas (Acosta et al., 2013; Guelli et al., , 2011). Por lo tanto, surge la oportunidad de implementar medidas de prevención y eficiencia como estrategias efectivas antes de enfocarse en medidas correctivas (Chabalina, 2002). Un enfoque preventivo del uso de recursos, también se traduce en la disminución de costos económicos y ambientales a largo plazo. Dentro de las estrategias que se enfocan en el uso eficiente del recurso hídrico, está el reúso con o sin regeneración en otras fases del proceso productivo y el reciclaje enfocado a la regeneración de corrientes previo su uso en el mismo proceso productivo (Wang y Smith, 1994; Ríos et al., 2011). Las estrategias de caracterización ambiental, metodología *Water Pinch* y el *Sindex* (Índice de Segregación) se enmarcan en este contexto.

No todas las operaciones del galvanizado requieren la misma calidad de agua, por lo que las estrategias planteadas en el presente trabajo, facilitan el diseño de redes de agua de forma más selectiva, con lo cual, es posible reducir la generación de efluentes y delinear un tratamiento de aguas residuales diferenciado para su regeneración (Suárez, 2011; Uche, 2013). Este tipo de estrategias priorizan y efectivizan el diseño basado en reúso y después en reciclaje (Guelli et al., 2011; Oliver et al., 2008).

1.4. ALCANCE

El alcance de este trabajo de investigación, está enfocado en aplicar las estrategias de segregación de corrientes (*Sindex* y método *Pinch*) y la caracterización ambiental de una planta de la industria siderúrgica NOVACERO S.A. Por lo tanto, la información detallada en este trabajo representa datos reales recolectados por la planta en específico y obtenidos mediante el monitoreo y muestro realizado en la

misma. El alcance que este trabajo tiene es de directo beneficio para la planta estudiada y puede servir en forma referencial a plantas de la misma actividad productiva. Incluso, la metodología empleada con algunos cambios tiene aplicación en toda actividad productiva que utilice agua dentro de sus procesos.

A nivel específico, el trabajo desarrollado tiene un alcance a escala de propuesta debido a que la información obtenida, parte desde el análisis de inventario, monitoreo/muestreo de corrientes de agua y de los procesos productivos, determinación de balances de materia, indicadores de segregación (*Sindex* y metodología *Pinch*) y la obtención de modelos de redes de segregación de agua. En forma adicional, este estudio también evalúa el funcionamiento de la PT-RILes (Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos) de la planta estudiada, buscando potenciales estrategias para su optimización operativa, así como la propuesta de nuevas alternativas de tratamiento.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. PROCESO DE GALVANIZADO

La galvanoplastia es un proceso electrolítico (deposición vía electroquímica) o químico (deposición vía procesos de oxidación o reducción), que consiste en depositar capas finas de un metal (ánodo) sobre la superficie de una pieza metálica de acero o hierro (cátodo), en contacto con una solución salina (Rodríguez, 2015; De Lima et al., 2007).

Los ánodos empleados habitualmente son: cromo, cobre, zinc, níquel, cadmio, plomo, plata, estaño, oro, entre otros (Fresner et al., 2007).

No obstante, el proceso frecuentemente usado en la industria de la galvanoplastia es la inmersión en caliente, que utiliza básicamente como ánodo al zinc fundido a 450 °C (Morales y Acosta, 2010).

Este proceso denominado galvanizado en caliente o zincado, se divide en 3 etapas operativas:

- *Pre-tratamiento*, en esta etapa se realiza la preparación química de la superficie del metal base para una reacción homogénea, es decir, un recubrimiento metálico uniforme (CE, 2006). Las fases involucradas comprenden: desengrase, decapado, fundente y secado (Fresner et al., 2007).
- *Galvanizado*, en esta etapa la pieza de acero limpia se sumerge en un baño de zinc líquido para su recubrimiento metálico (Mazur et al., 2016).
- *Post-tratamiento*, finalmente en esta etapa se controla el espesor del recubrimiento, así como la aparición de óxido blanco (Kong y White, 2010). Dentro de la misma existen las fases de enfriamiento y pasivado (Mazur et al., 2016).

2.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE GALVANIZADO

Las fases que integran el proceso de galvanizado en caliente por inmersión y la descripción de cada una, se detallan en la Tabla 2.1.

TABLA 0.1 Fases del proceso de galvanizado en caliente

Fase	Descripción
Desengrase	<p>Elimina los restos de grasa y aceite de la superficie de las piezas metálicas, procedentes de las etapas de producción previas (Fresner et al., 2007). El proceso consiste en la sumersión de las piezas metálicas en soluciones acuosas alcalinas (40-85°C) o ácidas (20-40°C).</p> <p>Las <i>soluciones alcalinas</i> más usadas son: hidróxido sódico, carbonato sódico, silicatos, fosfatos, agentes cáusticos y tensoactivos. Mientras que, las <i>soluciones ácidas</i> pueden ser: ácido clorhídrico/fosfórico, agentes anticorrosivos y solubilizantes (Fresner, et al., 2007; García, 2014).</p>
Enjuague	<p>En caso de que en la fase anterior se opte o requiera utilizar un agente alcalino, es necesario un lavado intermedio de las piezas para evitar el arrastre de las sustancias del desengrase y la consecuente neutralización del ácido decapante (IHOBE S.A., 2000).</p>
Decapado	<p>Elimina películas de óxido de hierro incrustado o superficial, sumergiendo la pieza de acero en una solución diluida de ácido clorhídrico (14-16% en peso) o ácido sulfúrico (10-14%) (ASIMET, 2013).</p> <p>Además, en esta fase con el fin de evitar el ataque al material base es necesario la adición de sustancias inhibidoras (hexametilentetramina) (Chávez et al., 2009).</p>
Enjuague	<p>Posterior al decapado se efectúan de uno o dos baños de las piezas en agua corriente a temperatura ambiente, para prevenir el arrastre de ácido y de sales de hierro (ASIMET, 2013).</p>
Fluxado o Fundente	<p>Facilita la reacción de la pieza metálica con el zinc fundido, al introducirlas en soluciones compuestas a base de sales de cloruro de amonio (40%) y de zinc (60%) en pH entre 4 y 5 y temperatura entre 25 y 70°C (Kong y White, 2010).</p> <p>Otro efecto de esta fase, es la supresión de la película superficial de óxido de hierro formada en acero reactivo, después del decapado y la prevención de oxidación previa al galvanizado (García, 2014).</p>

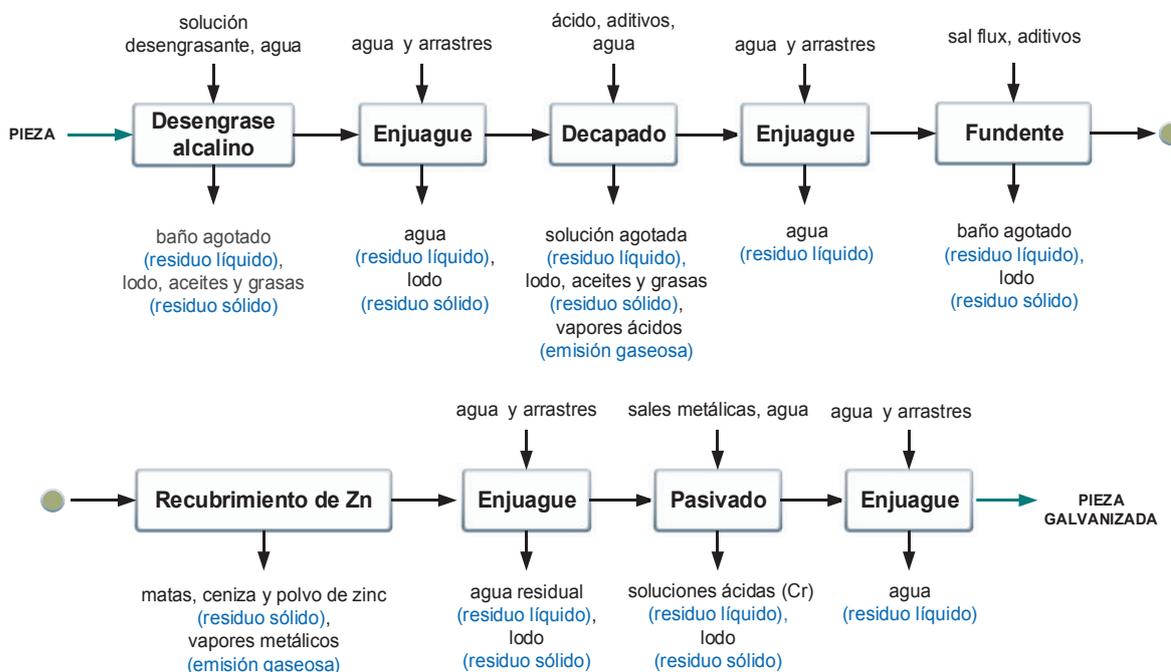
Tabla Continuación...

Fase	Descripción
Recubrimiento metálico	Esta fase se lleva a cabo mediante la inmersión de las piezas de hierro o acero en un baño de zinc fundido (~440-460°C) para recubrirlas por medio de la formación de aleaciones de Fe-Zn en su superficie (Pokorný et al., 2017). Finalmente, las películas de aleación son cubiertas por una fina capa externa (~5-125 µm) de zinc dúctil no aleado (García, 2014).
Enjuague y secado	Las piezas metálicas son sometidas a baños de enfriamiento con agua dulce a temperatura ambiente (Chávez et al., 2009).
Pasivado	Por lo general, en esta fase se utilizan soluciones de dicromo o de silicatos para proteger al acero unido metalúrgicamente al zinc de la mancha de almacenamiento húmedo (óxido blanco) (Kong y White, 2010).

ELABORACIÓN: Salazar K.

El diagrama de flujo general (entradas/salidas) del proceso de galvanizado en caliente, con un desengrase alcalino se ilustra en la Figura 2.1.

FIGURA 0.1 Diagrama de flujo del proceso de galvanizado



Nota. () Señala el estado del residuo generado en cada fase del proceso

FUENTE: Comisión Ambiental Metropolitana (1998); Fresner, et al. (2007)

ELABORACIÓN: Salazar K.

2.2. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL GALVANIZADO

2.2.1. GENERACIÓN DE CORRIENTES RESIDUALES

2.2.1.1. Residuos líquidos

Como ya se mencionó, entre cada operación del proceso de galvanizado se realiza el lavado de las piezas metálicas para evitar el arrastre de las sustancias químicas utilizadas en la fase previa. Esta actividad genera residuos líquidos industriales, con volúmenes cercanos a los 400 y 570 L/t acero galvanizado, correspondiente al 95% del agua utilizada en el proceso (ASIMET y CPL, 2014; Kong y White, 2010; Ríos et al., 2011).

Los residuos líquidos galvánicos se caracterizan por valores de pH entre 6,5 y 9,5 y temperaturas inferiores a 30°C (Berradi et al., 2014). Además, poseen sólidos suspendidos comprendidos entre 120 a 2000 mg/L, grasas y aceites que fluctúan entre 10 a 200 mg/L, hidrocarburos o HAP (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos) entre 0,2 a 10,1 mg/L y metales pesados (CE, 2006). No obstante, el tipo y concentración de metales pesados presentes en los efluentes estará en función del proceso productivo y de la materia prima utilizada (Sharma et al., 2007). Los más comunes son Cd con concentraciones del orden de 82 000 mg/L procedente de todo el proceso y entre 48 a 240 mg/L en las tinas de enjuague (Martínez et al., 1995). El Zn ocupa valores de 33 800 mg/L en los baños de proceso y entre 70 a 350 mg/L en el enjuague y Cu con valores que fluctúan entre 107 a 535 mg/L en los procesos, y entre 2,8 a 14 mg/L en los enjuagues (Silva et al., 2000).

2.2.1.2. Residuos sólidos y semisólidos

El nivel de generación de residuos en estado sólido y semisólido durante el proceso se encuentra entre los 35 a 40 kg/t acero galvanizado (Chávez et al., 2009; Lobato et al., 2015). La principal fase generadora de residuos corresponde al recubrimiento metálico. En esta sección, la incidencia de los residuos siderúrgicos representa el 46% del consumo de zinc dentro del proceso (García, 2014).

Este tipo de residuos se describen con mayor profundidad en la Tabla 2.2.

TABLA 0.2 Residuos sólidos procedentes del proceso de galvanizado

Residuo	Descripción
Matas/escoria	Comprenden compuestos inter-metálicos, formados por una aleación entre el Zn y Fe, que por su densidad precipitan en el fondo de la cuba de Zn fundido (Delvasto et al., 2012). Estos residuos contienen un 95% en Zn y un 5% en Fe (García, 2014).
Ceniza	Constituye una mezcla de ZnO y Zn arrastrado, que se deposita en la superficie de Zn líquido (Kong y White, 2010). Estos residuos se forman por la interfase entre la superficie de la cuba de Zn y la atmósfera y por los aditivos fundentes (Delvasto et al., 2012). Además, presentan un contenido de Zn superior al 80% (ASIMET, 2013).
Polvos	Corresponden al material residual, generado por las operaciones de post-tratamiento (secado, escurrido y regulación de espesores) de las piezas de acero recubiertas (Delvasto et al., 2012).

ELABORACIÓN: Salazar K.

2.2.1.3. Emisiones atmosféricas

Las emisiones atmosféricas generadas, principalmente en las fases de decapado y zincado, comprenden gases clorados ($\text{HCl} = 0,1\text{-}5 \text{ mg/m}^3$), material particulado ($\text{PM}_{10} = 1 \text{ mg/m}^3$) y vapores metálicos (como $\text{Zn} = 2\text{-}20 \text{ mg/m}^3$) (CE, 2006).

2.2.2. IMPACTOS AMBIENTALES

La potencial contaminación por metales pesados, vinculada con el proceso de galvanizado, supone un grave problema ambiental (Tovar et al., 2012). Los efluentes con concentraciones de metales pesados, al llegar a cuerpos de agua por infiltración o por descargas industriales no controladas; provocan cambios físicos, químicos y biológicos, tales como: turbidez, aumento de la demanda de oxígeno, disminución en el pH a valores inferiores a 6, toxicidad (aguda, crónica o sub-crónica), disminución de la abundancia de plancton, y formación de acumulaciones de sedimento (Vera et al., 2016). Cuando estos efluentes ingresan al organismo objetivo o no objetivo (plantas o animales) mediante ingesta (alimento y agua) o inhalación, inactivan enzimáticamente a la síntesis de proteínas, causando daños irreversibles (lesión celular) (Ferrer, 2003; Soto et al., 2004). Además, los metales pesados tienden a bioacumularse en órganos diana, afectando principalmente al sistema gastrointestinal, neurológico central y periférico, hepático y renal (Bolaños

et al., 2014). La inadecuada disposición de los lodos metálicos no inertizados, puede desencadenar: acidificación, degradación, desertificación, así como cambios en la alcalinidad, temperatura, humedad, condiciones redox y disminución de la productividad de suelos (Tejada et al., 2012; Romero, 2009). Las partículas metálicas que se adhieren a partículas suspendidas de la atmósfera o volatilizan forman nieblas o brumas que se transportan por el viento y potencialmente afectan directa/indirectamente a la salud humana (Méndez et al., 2009).

En forma resumida, la Figura 2.2 presenta los principales impactos derivados de esta actividad productiva.

FIGURA 0.2 Impactos ambientales del proceso de galvanizado

Agua	Suelo	Aire	Biomasa
<ul style="list-style-type: none"> •Turbidez •Aumento de la demanda de oxígeno •Disminución del pH •Aumulaciones de sedimento 	<ul style="list-style-type: none"> •Acidificación •Degradación •Desertificación •Cambio humedad y temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> •Niebras o brumas con partículas metálicas •Emisiones de gases clorados 	<ul style="list-style-type: none"> •Toxicidad •Bioacumulación

ELABORACIÓN: Salazar K.

2.3. TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS LÍQUIDOS DEL GALVANIZADO

El tratamiento de los residuos líquidos galvánicos tiene como finalidad remover el material contaminante (orgánico, inorgánico, suspendido o disuelto) trasferido al agua por el proceso productivo (Lapeña y Rigola, 1990). Un adecuado tratamiento interno de estos residuos industriales líquidos evita la pérdida de su calidad para las aplicaciones de recirculación en el proceso o en su defecto para su descarga hacia el alcantarillado o un cuerpo de agua (Ríos et al., 2011; Wan et al., 2013).

En general, las etapas requeridas para la disminución del nivel de contaminación en las descargas en esta actividad industrial se pueden dividir en: *tratamiento*

preliminar o pretratamiento, primario y terciario (Angel y Salamanca, 2017 ; Savelski y Bagajewicz, 2000). Sin embargo, la depuración del residuo líquido industrial se alcanza mediante la integración de operaciones unitarias y procesos (físico-químicos) seleccionados en función de las características del residuo a tratar (Noyola et al., 2013).

La Tabla 2.3 presenta las etapas de tratamiento de los residuos líquidos del galvanizado y las operaciones unitarias que componen dichas etapas.

TABLA 0.3 Etapas involucradas en el tratamiento de residuos líquidos del galvanizado

Etapas de tratamiento	Objetivo	Tipo de proceso	Tecnología	Operación unitaria
<i>Preliminar</i>	Elimina sólidos gruesos y arenas en suspensión.	Físico	- Criba o rejilla - Desarenador - Desengrasador - Tanque de homogenización - Mezcla	- Cribado - Sedimentación - Filtración o flotación - Homogenización del caudal* - Mezclado*
<i>Primario</i>	Suprime sólidos sedimentables (40-70% eficiencia) y materia orgánica suspendida (>30 %)	Físico-químico	- Sedimentador primario - Procesos de precipitación química - Floculador	- Sedimentación - Precipitación química - Coagulación-floculación*
<i>Terciario o Avanzado</i>	Suprime constituyentes en particular, tal como: nutrientes, excesos de materia orgánica, iones específicos, etc.	Físico Químico Biológico	- Filtro - Adsorción con CA - Membranas filtrantes - Intercambiador iónico	- Filtración - Adsorción - Filtración con membranas* - Intercambio iónico

Nota. (*) Operaciones unitarias de la PT-RILes de la planta evaluada, (CA) carbón activado

FUENTE: Caldera (2009), Ramalho (1990)

ELABORACIÓN: Salazar K.

A continuación se presentan las operaciones unitarias que tienen lugar en el tratamiento de la planta industrial evaluada.

2.3.1. OPERACIONES UNITARIAS UTILIZADAS EN TRATAMIENTO

2.3.1.1. Homogenización del caudal

La homogenización del caudal, en línea o derivación (con un tanque de retención), es una operación unitaria tipo física que amortigua las fluctuaciones de caudal de los residuos líquidos descargados en las diferentes fases productivas del galvanizado. Frecuentemente, se utiliza para este fin un tanque de homogenización, esta tecnología permite mantener relativamente constante el caudal y la concentración de contaminantes para las siguientes etapas de tratamiento (Ramalho, 1990). Los residuos líquidos galvánicos requieren esta etapa de pretratamiento, para la estabilización del pH y de las cargas de iones metálicos de la corriente a tratar (Sun Kou, 2000). Lo cual, indirectamente mejora el control de la dosificación de los reactivos utilizados en las operaciones posteriores (Kurniawan et al., 2006).

El tanque de homogenización de la PT-RILes de la planta industrial analizada posee un volumen aproximado de 164 m³, con un tiempo de residencia igual a 55 horas, y recibe 8 corrientes de residuos líquidos.

2.3.1.2. Sedimentación

La sedimentación es una operación unitaria basada en un proceso físico, que dentro del tratamiento de residuos líquidos galvánicos se utiliza en la etapa de tratamiento preliminar o primario para separar por acción de la gravedad, sólidos en suspensión (40-70%). Típicamente, esta operación elimina materia orgánica medida como DBO₅ (Demanda Biológica Orgánica) con una eficiencia entre 25-40%, y DQO (Demanda Química Orgánica) entre 20-35% (Rojas, 2002). El tanque sedimentador de la PT-RILes de la planta industrial analizada cuenta con una dimensión de 45 m³, y un tiempo de residencia cercano a 15 horas.

2.3.1.3. Mezclado

El mezclado es una operación unitaria utilizada cuando se requiere que un reactivo químico esté completamente mezclado en el residuo líquido (Muñoz, 2008). Dentro

del tratamiento de residuos líquidos galvánicos tiene lugar en reactores (etapa primaria) previo a operaciones de floculación y en tanques de almacenamiento (etapa terciaria) (Caldera, 2009). Utilizando para ello, una mezcla rápida continua (<30 segundos), mediante *dispositivos Venturi, bombeo*, reactores, o mezcladores estáticos o mecánicos (Metcalf y Eddy, 1995).

2.3.1.4. Precipitación química

La precipitación química es una operación unitaria fundamentada en un proceso físico-químico, utilizada en el tratamiento primario de los residuos líquidos para disminuir el material en suspensión, contenido en sales, y carga biodegradable (Rojas, 2002). Esta operación consiste en agregar sustancias químicas específicas al agua residual para alterar el estado físico de los sólidos (disueltos o en suspensión) de tal forma que sedimenten (Muñoz, 2008).

En el caso de depuración de residuos líquidos galvánicos, se usa como una operación de separación de su contenido de iones metálicos. La estrategia de remoción considera, los niveles de solubilidad de los metales en función del pH del residuo, esto debido a que la mayoría de los metales son solubles en medios ácidos y precipitan en medios alcalinos. Por lo que, generalmente se ajusta el pH de los residuos a condiciones básicas (pH 9-11) con una solución mixta con sosa (NaOH) y lechada de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (CE, 2006). Posteriormente, los iones metálicos disueltos son transferidos a la fase sólida insoluble (precipitado) en forma de hidróxido (Kurniawan et al., 2006). En general, se han obtenido eficiencias en la eliminación de SST (Sólidos Suspendidos Totales) (60-80%), SFT (Sólidos Filtrables Totales) (20%), DQO (30-60%), DBO_5 (40-70%), N-NH_3^+ (Amoníaco) (5-15%), Zn (Zinc) (99%), Ni (Níquel) (71%) y Cu (Cobre) (80%) (Kurniawan et al., 2006, Marín, 2013; Muñoz, 2008; Rojas, 2002).

2.3.1.5. Coagulación y floculación

La coagulación es el proceso de desestabilización de las partículas suspendidas presentes en el agua, que busca disminuir las fuerzas entre ellas. Consiste en la neutralización de cargas superficiales y la posterior precipitación de las partículas

coloidales, por la adición de un electrolito de carga opuesta (Lapeña y Rigola, 1990). Este mecanismo, se emplea en el tratamiento de residuos líquidos galvánicos, para la eliminación de partículas coloidales (10^{-3} - $1 \mu\text{m}$) y suspendidas ($>1,0 \mu\text{m}$) con una eficiencia de eliminación típica entre 80 y 90%, carga biodegradable cuantificada por medio de la DQO (40-82%), Fe (99 %), Zn (99%) y Cu (95-99%) (Kurniawan et al., 2006; Gómez, 2013; Metcalf, 1970; Marín, 2013; Soto et al., 2004).

Las principales sustancias con propiedades coagulantes utilizadas en el tratamiento de residuos líquidos del galvanizado son: sulfato de aluminio, cloruro férrico, sulfato ferroso/férrico, y policloruro de aluminio. Los cuales se incorporan en solución al residuo líquido, provocando el efecto de coalescencia de las partículas (Gonzalo, 2002).

La floculación es el proceso en el cual las partículas desestabilizadas, se unen entre sí para conformar aglomerados estables, flocs, que son susceptibles de decantación o sedimentación (Aguilar, 2002). Estos agregados por su mayor peso sedimentarán por gravedad (Gonzalo, 2002). En el caso de los residuos líquidos del galvanizado, la energía externa que permite la formación de los flóculos (macrofloculación), es de origen mecánico (Marín, 2013).

El floculador de la PT-RILes de la planta industrial analizada tiene una capacidad de 12 m^3 y un tiempo de residencia de 2 horas.

2.3.1.6. Filtración

La filtración es una operación física utilizada en la etapa terciaria de tratamiento de los residuos líquidos del galvanizado para suprimir las partículas en suspensión remanentes de procesos de sedimentación por medio del paso del agua en un medio poroso encargado de retener dichos componentes (Weber, 2003).

- *Filtración por gravedad*

En este tipo de filtración, la gravedad actúa como fuerza conductora del residuo líquido en su descenso a través del filtro, en el cual los sólidos son suprimidos por

asentamiento, retención y adsorción (Weber, 2003). En el tratamiento de residuos líquidos galvánicos comúnmente se utiliza un filtro con medio granular (grava), posterior a una operación unitaria de precipitación química, en el cual las partículas se retienen en la capa más externa del medio (Lapeña y Rigola, 1990).

- *Filtración con membranas*

La operación de filtración con membranas es una unidad no destructiva, clave en aplicaciones de recirculación de residuos líquidos inorgánicos (galvanizado). Las tecnologías de membranas filtrantes pertenecen a este tipo de operaciones y se fundamentan en la separación de sólidos suspendidos y compuestos orgánicos e inorgánicos (Kurniawan et al., 2006). Mediante su conducción a través de medios semipermeables, utilizando la presión como fuerza motriz (Ríos et al., 2011; Trapote y Martínez, 2012).

La membrana filtrante de la PT-RILes de la planta industrial analizada se basa en un proceso de ósmosis inversa y posee un volumen cercano a los 13 m³. En este proceso, el residuo líquido galvánico (solvente) es bombeado a elevada presión (>10 atm) hacia la membrana, donde la corriente se difunde y por otro lado, existe una segunda corriente concentrada en sales (soluteo y parte del solvente) que no pasaron por la membrana (Trapote y Martínez, 2012).

Esta tecnología remueve habitualmente la mayoría de los sólidos inorgánicos u orgánicos disueltos (<0,001 µm) en el agua hasta el 99%, SST (95-98%), DQO (90-95%), Cu (98%), Zn (99%) y Ni (97%) (Kurniawan et al., 2006; Rojas, 2002).

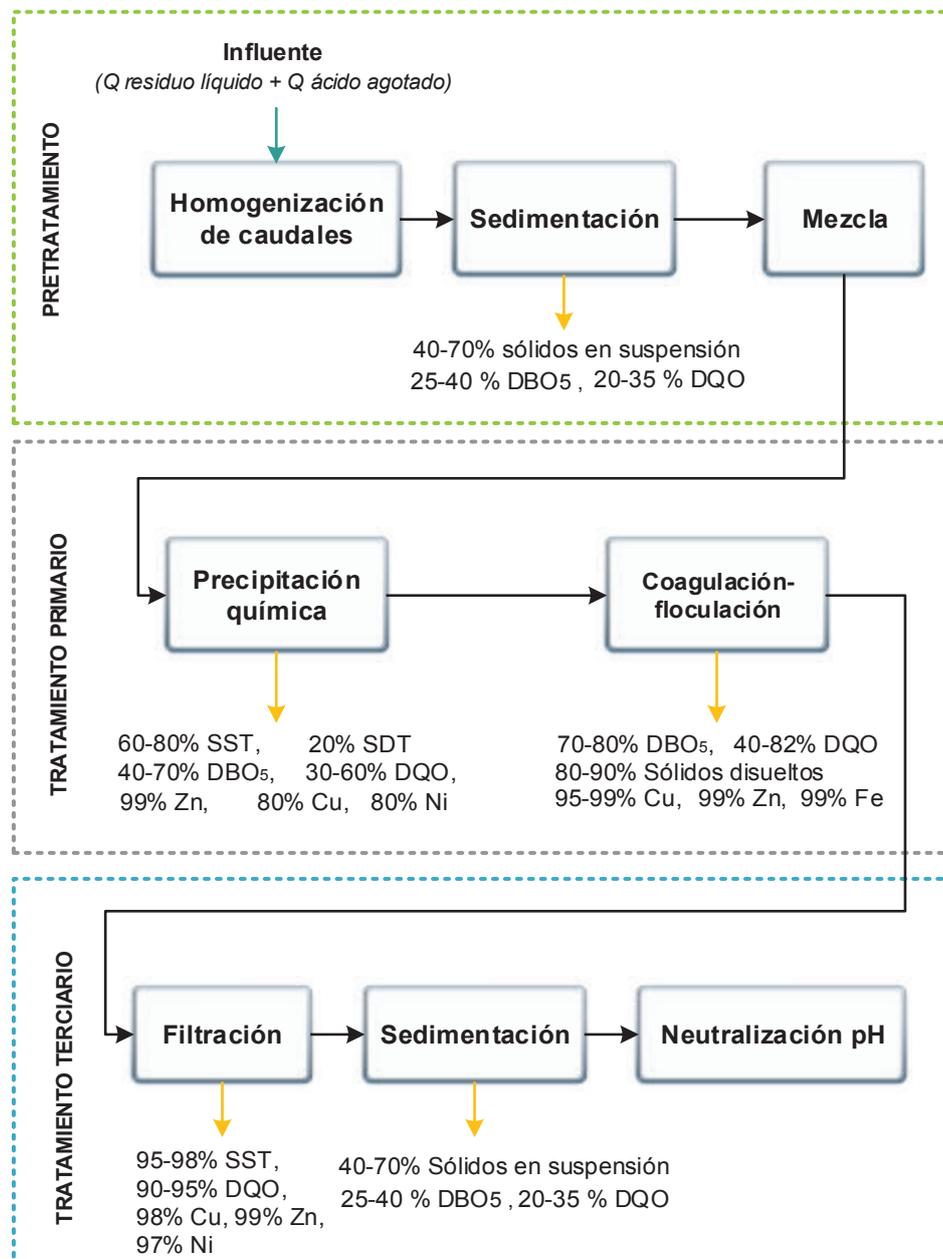
2.3.1.7. Neutralización del pH

La operación unitaria de neutralización o corrección de pH, permite ajustar el pH final del efluente del tratamiento antes de su descarga al cuerpo receptor (Lapeña y Rigola, 1990). Los residuos líquidos de las actividades de acabado superficial como el galvanizado normalmente utilizan el cloro como agente acondicionador de pH, debido a su elevada capacidad de oxidación (Ramalho, 1990). El tanque de neutralización del pH de la PT-RILes de la planta industrial analizada presenta un

volumen de 20 m³, tiempo de residencia de 2 horas y un efluente con un pH entre 7 a 9.

La Figura 2.3 expone los porcentajes de remoción de contaminantes comúnmente referenciadas para residuos líquidos en las operaciones anteriormente detalladas.

FIGURA 0.3 Eficiencias de eliminación para residuos líquidos industriales



FUENTE: Marín (2013), Muñoz (2008), Rojas (2002)

ELABORACIÓN: Salazar K.

2.4. ESTRATEGIAS DE REÚSO Y RECICLAJE DE CORRIENTES LIQUIDAS PROCEDENTES DEL PROCESO PRODUCTIVO DE GALVANIZADO

2.4.1. GENERALIDADES DEL REÚSO Y RECICLAJE DE RESIDUOS LÍQUIDOS

El reúso y reciclaje del agua, así como su utilización selectiva, son factores clave orientados hacia la minimización de los consumos de agua fresca dentro de un proceso productivo (Wang y Smith, 1994). La disposición de una red interconectada de las corrientes de agua que incorpore en su diseño estos criterios, necesita de la identificación de las posibles vías de recuperación de agua con la calidad que requiere cada fase de producción, así como también de la cuantificación de los flujos de agua (alimentación y descarga) (González et al., 2004; Hu et al., 2011; Rašković, 2010). Para definir dichas vías de recuperación, habitualmente se emplea un balance de materia y la estimación de las concentraciones de contaminantes en el residuo líquido (Fabelo et al, 2013). Esta última se consigue a través de la caracterización del residuo, es decir, el diagnóstico de sus características físicas, químicas y biológicas (García, 2014). Toda esta información surge de la caracterización ambiental del proceso (Rivela et al., 2004).

El diseño de la red de agua requiere en primera instancia la definición del flujo máximo de agua reusada que podría incorporarse eventualmente en el proceso, lo cual se puede determinar mediante el método *Water Pinch* (Yang et al., 2000). Posteriormente, para completar el diseño es necesario optimizar la estrategia de regeneración de los residuos líquidos, para lo cual se puede considerar un tratamiento diferenciado para aquellos residuos líquidos que no pueden ser objeto directo de reúso. Para tal fin, se continúa con la aplicación del *Sindex* (Índice de Segregación) (Fabelo et al, 2013).

2.4.1.1. Reúso, regeneración-reúso, regeneración-reciclaje de corrientes líquidas

La demanda inherente de agua fresca dentro de un proceso productivo puede verse disminuida por medio de tres enfoques esenciales, que comprenden: reúso directo,

reúso después de un proceso de regeneración y el reciclaje posterior a la regeneración del residuo líquido (Guelli et al., 2011; Prakotpol y Srinophakun, 2004).

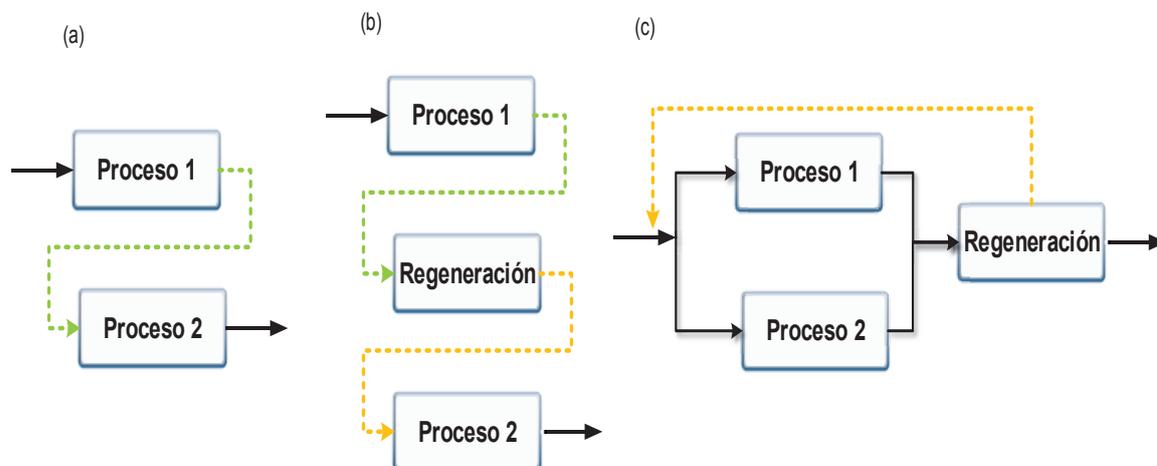
La diferencia entre cada término se detalla a continuación:

- *Reúso de residuos líquidos*, esta posibilidad implica modificar la red de agua existente para aprovechar de forma parcial o total las corrientes líquidas de salida de ciertas fases, para utilizarlas directamente como flujo de entrada en una fase distinta del proceso (Figura 2.4a) (Balla et al., 2017; Mehrdadi et al., 2009; Relvas et al., 2008). Cuyo objetivo es minimizar el volumen de agua fresca consumida sin alterar el proceso, no obstante el nivel de contaminación de las corrientes a reutilizar no debe sobrepasar la concentración permisible (calidad aceptable) que rige la operación a la ingresa (Mariano et al., 2005; Wang y Smith, 1994).
- *Regeneración-reúso del agua*, en este enfoque el residuo líquido de determinadas fases se regenera por medio de un tratamiento parcial o intermedio, que elimina la concentración de sus contaminantes (Figura 2.4b). De modo que puedan ser reutilizadas como flujo de entrada en otra etapa distinta del proceso (Priya y Bandyopadhyay, 2017; Wan Alwi y Manan, 2013).
- *Regeneración-reciclaje del agua*, en esta estrategia se eliminan de los residuos líquidos los contaminantes acumulados en todo el proceso productivo (Mehrdadi et al., 2009). En la cual, posterior al tratamiento, el agua regenerada puede eventualmente ser redirigida a una fase donde fue utilizada previamente (Figura 2.4c) (Relvas et al., 2008).

La distribución de la red de agua industrial puede combinar estas estrategias de minimización de manera simultánea (Hu et al., 2011).

No obstante, estas posibilidades pueden verse restringidas por el balance de masa entre operaciones y las concentraciones máximas permitidas a la entrada y salida de las fases (Mann y Liu 1999).

FIGURA 0.4 Estrategias de reúso y reciclaje de corrientes para minimizar la generación de residuos líquidos



Nota. (a) reúso (b) regeneración-reúso y (c) regeneración-reciclaje

FUENTE: Wang y Smith (1994); Relvas et al. (2008); Wan Alwi y Manan (2013)

ELABORACIÓN: Salazar K.

2.4.2. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL

La caracterización ambiental consiste en una evaluación detallada del proceso, respecto a las entradas (materia prima, insumos, agua) y salidas (producto elaborado, residuos y emisiones) (Rivela et al., 2004). Esta herramienta cuantifica y caracteriza todas las corrientes residuales (residuos líquidos, residuos sólidos y emisiones gaseosas), para entender y simplificar cualquier proceso a términos de balances de materia (Ates et al., 1997). Por medio de dicho balance, es posible estimar índices específicos de consumo de insumos (agua y productos químicos) y de generación de residuos, en función de una unidad productiva (Lorber et al., 2007). Entendiéndose a la unidad productiva como la relación entre la cantidad de producto obtenido y de recursos utilizados para obtener el mismo (Del Valle, 2005).

2.4.2.1. Balance de materia

El balance de materia es una cuantificación de los flujos de entrada y salida de un proceso determinado, que refleja la distribución entre productos y residuos (descargas líquidas, residuos sólidos y emisiones) (González et al., 2015).

En particular, permite detectar los puntos críticos, es decir, fuentes generadoras de residuos dentro de cualquier proceso (IHOBE S.A., 2000).

2.4.3. METODOLOGÍA WATER PINCH

La metodología de concentración óptima de flujos (*Water Pinch*) es un método de optimización algebraica que permite definir el consumo mínimo de agua fresca requerida en un proceso, que en consecuencia genera la cantidad mínima de descarga de residuos líquidos (Balla et al., 2017, Mariano et al., 2005; Rašković, 2010; Yang et al., 2000). Para ello, analiza la configuración de la red de agua con la finalidad de disminuir su consumo y establecer las oportunidades de reutilización en el proceso, regeneración y reciclaje de efluentes (Wang y Smith, 1994; Thevendiraraj et al., 2003).

En este contexto, Wang y Smith (1994) desarrollaron el método gráfico *Water Pinch* para la integración másica de las fases demandantes de agua dentro de un proceso (Guelli et al., 2011). El término integración másica de las operaciones está referido al enfoque de entendimiento y visualización global de los flujos de agua que componen el proceso, en lugar del análisis de un flujo independiente (Dunn, 2000).

El método propuesto por estos autores, se basa en la síntesis de la red de intercambio másico de contaminantes o la transferencia de especies indeseables de una corriente rica hacia otra pobre, bajo diferentes modelaciones (Guelli et al., 2011; Priya y Bandyopadhyay, 2017).

Generalmente, se considera el potencial de utilizar residuo líquido, agua regenerada y/o agua fresca como una corriente pobre para absorber uno o varios contaminantes del flujo de una fase productiva (Balla et al., 2017).

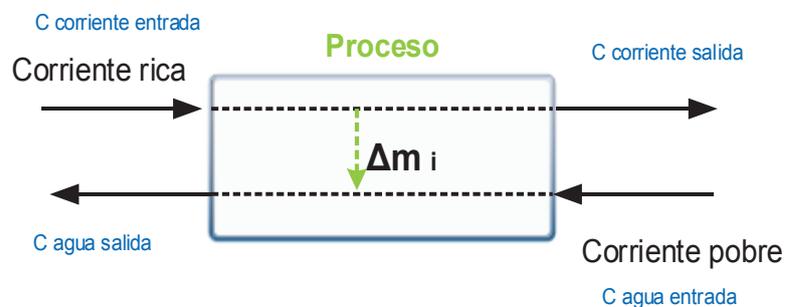
Si el intercambio de masa se basa en la transferencia de un contaminante, el problema se resolverá como un único contaminante. Sin embargo, si incluye la transferencia de dos o más contaminantes, el problema se resolverá como múltiples contaminantes (Mohammadnejad et al., 2012).

2.4.3.1. Operaciones con transferencia de masa

Una operación basada en la transferencia de masa se caracteriza por el intercambio preferencial de especies de una corriente rica hacia una corriente pobre (Manan et al., 2004; Prakotpol y Srinophakun, 2004). En dicha fase u operación se supone que los caudales de entrada y salida son los mismos. Por lo tanto, este tipo de operaciones también se conocen como un problema de caudal fijo (Wan Alwi y Manan, 2013).

Respecto a las redes de agua residual, se supone que el agua es un agente de separación másica (flujo pobre) que funciona para eliminar las impurezas de una corriente rica en contaminantes. Siempre que exista una diferencia de concentración (fuerza motriz) entre las mismas (Prakotpol y Srinophakun, 2004; Wan Alwi y Manan, 2013). La Figura 2.5 detalla el diagrama de bloque del intercambio de masa entre las corrientes.

FIGURA 0.5 Diagrama de bloque del intercambio de masa



Nota. (C) concentración, (Δm_i) transferencia o carga másica

FUENTE: Relvas et al. (2008)

ELABORACIÓN: Salazar K.

2.4.3.2. Balance de contaminantes transferidos al agua

- *Reúso - Contaminante único o individual*

La Figura 2.6 ilustra el modelo de la estructura de cualquier fase u operación de un proceso cuya red de agua incluye el reúso de residuos líquidos.

FIGURA 0.6 Modelo de la estructura general de una operación con reúso de residuos líquidos



FUENTE: Prakotpol y Srinophakun (2004)

ELABORACIÓN: Salazar K.

De acuerdo con la Figura 2.6, la restricción para el balance de masa del agua alrededor la operación presenta la forma indicada en la Ecuación 2.4.

$$F_i + \sum_{j \neq i} X_{i,j} - W_i - \sum_{j \neq i} X_{j,i} = 0 \quad [0.4]$$

Dónde:

F_i = caudal de agua fresca que ingresa en la operación i , en m^3/h .

$X_{i,j}$ = caudal de residuo líquido de la operación j reusado en la operación i , en m^3/h .

W_i = caudal de residuo líquido de desecho de la operación i , en m^3/h .

$X_{j,i}$ = caudal de residuo líquido de la operación i reusada en la operación j , en m^3/h .

Mientras que, el balance de masa de contaminantes transferidos al agua alrededor la operación se puede formular según la Ecuación 2.5.

$$\sum_{j \neq i} C_{j,sal} X_{i,j} + \Delta m_i - C_{i,sal} (W_i + \sum_{j \neq i} X_{j,i}) = 0 \quad [2.5]$$

Dónde:

$C_{j,sal}$ = concentración a la salida de la operación j , en mg/L .

$C_{i,sal}$ = concentración a la salida del agua posterior a la operación i , en mg/L .

Δm_i = carga másica total de contaminante transferido desde la operación i , en kg/h .

Por otra parte, la concentración de entrada promedio a la operación debe ser menor o igual a la concentración máxima permitida en la entrada $C_{i,ent}^{m\acute{a}x}$ (Prakotpol y

Srinophakun, 2004). Esta restricción se formula de la siguiente manera (Ecuación 2.6):

$$C_{i,ent} = \frac{\sum_{j \neq i} X_{ij} C_{j,sal}}{\sum_{j \neq i} X_{ij} + F_i} \leq C_{i,ent}^{m\acute{a}x} \quad [2.6]$$

Dónde:

$C_{i,ent}$ = concentración promedio a la entrada de la operación i, en mg/L.

$C_{i,ent}^{m\acute{a}x}$ = concentración máxima de entrada de la operación i, en mg/L.

La concentración de salida corresponderá a la suma de la concentración de entrada y al cambio en la concentración debido a la carga másica de contaminante transferido (Mariano et al., 2005; Prakotpol y Srinophakun, 2004). Tal como se expone en la Ecuación 2.7.

$$C_{i,sal} = C_{i,ent} + \frac{\Delta m_i}{\sum_{i \neq j} X_{ij} + F_i} \leq C_{i,sal}^{m\acute{a}x} \quad [2.7]$$

No obstante, para maximizar el reúso del agua, la concentración de salida debe alcanzar la concentración límite de salida (Mariano et al., 2005). Entonces la Ecuación 2.5 se convierten en la Ecuación 2.8.

$$\sum_{j \neq i} C_{j,sal}^{m\acute{a}x} X_{i,j} + \Delta m_i - C_{i,sal} (W_i + \sum_{j \neq i} X_{j,i}) = 0 \quad [2.8]$$

Dónde:

$C_{i,sal}^{m\acute{a}x}$ = concentración máxima de salida de la operación i, en mg/L.

- *Regeneración-reciclaje - Contaminante único o individual*

El modelo de la estructura de una red de agua con reúso de residuos líquidos y regeneración-reciclaje de agua se ilustra en la Figura 2.7. De acuerdo con la cual, el balance hídrico y de contaminantes en torno al proceso de regeneración se describe con las Ecuaciones 2.9-2.11.

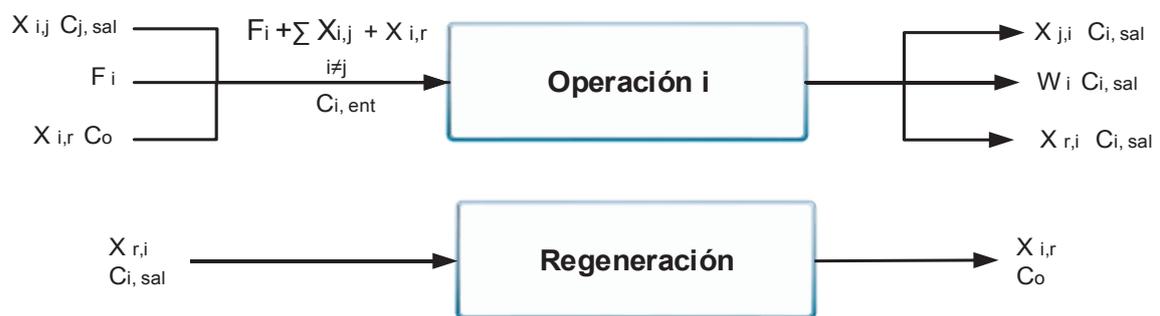
$$F_i + \sum_{j \neq i} X_{i,j} + X_{i,r} - W_i - \sum_{j \neq i} X_{j,i} - X_{r,i} = 0 \quad [2.9]$$

Dónde:

$X_{r,i}$ = caudal de agua de la operación i conducido hacia la regeneración, en m^3/h .

$X_{i,r}$ = caudal de agua de la operación i procedente de la regeneración, en m^3/h .

FIGURA 0.7 Modelo de la estructura general de una operación con regeneración-reciclaje del agua



FUENTE: Prakotpol y Srinophakun (2004)

ELABORACIÓN: Salazar K.

$$\sum_{j \neq i} C_{j,sal}^{max} X_{i,j} + C_o X_{i,r} + \Delta m_i - C_{i,sal}^{max} (W_i + \sum_{j \neq i} X_{j,i} + X_{r,i}) = 0 \quad [2.10]$$

Dónde:

C_o = concentración de salida del proceso de regeneración, en mg/L .

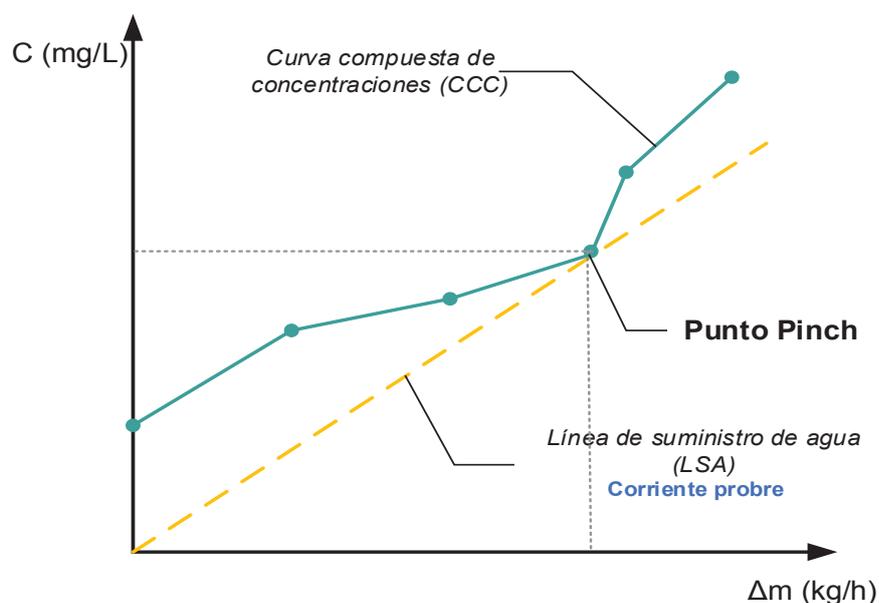
$$C_{i,ent} = \frac{\sum_{j \neq i} X_{i,j} C_{j,sal}^{max} + X_{i,r} C_o}{\sum_{j \neq i} X_{i,j} + F_i + X_{i,r}} \leq C_{i,ent}^{max} \quad [2.11]$$

2.4.3.3. Curva Compuesta de Concentraciones

La Curva Compuesta de Concentraciones (CCC), representada en la Figura 2.8, fue introducida por Wang y Smith (1994) para la configuración del sistema de distribución de la red de agua y es aplicable únicamente para operaciones o fases con transferencia de masa (flujo fijo) (Kuo y Smith, 1998; Kutepov et al., 2002; Prakash y Shenoy, 2005). Esta aproximación gráfica ofrece el reúso y reciclaje

máximo del agua de proceso, considerando la posibilidad de un tratamiento parcial antes de la reutilización (regeneración-reúso) o un tratamiento total previo a su reciclaje (regeneración-reciclaje). Esta curva es analizada bajo únicos o múltiples contaminantes respecto a limitaciones de caudal y de las fuentes de agua (Alva-Argáez et al., 2007; Mohammadnejad et al., 2012). El modelo comprende básicamente una curva de composición que representa la carga contaminante o másica (Δm_i) acumulada en el flujo de agua en el eje horizontal, frente a la concentración de contaminantes en el eje vertical (Prakash y Shenoy, 2005; Wang y Smith, 1994). La carga contaminante se define como la transferencia de masa de un contaminante específico al flujo total de agua en la operación (Mariano et al., 2005).

FIGURA 0.8 Diagrama de la Curva Compuesta de Concentraciones



Nota. (C) representa concentración del contaminante, (Δm) carga másica

FUENTE: Rašković, (2010)

ELABORACIÓN: Salazar K.

La curva relacionada con cada operación se traza especificando una concentración de entrada y salida máxima aceptable para cada fase del proceso (Savelski y Bagajewicz, 2000). Esta curva coincide con la línea de suministro de agua, también representada en la misma gráfica en un punto denominado *Pinch* (Khezri et al.,

2010). Dicho punto se alcanza por medio de ajustes sucesivos a los parámetros involucrados en el proceso (Fabelo et al, 2013). El recíproco de la pendiente del punto *Pinch* define el flujo mínimo requerido de agua fresca en el proceso productivo (Prakash y Shenoy, 2005). Por ende, garantiza el volumen mínimo de consumo de agua fresca entre las diferentes fases del sistema (Balla et al., 2017). Lo cual, es importante debido a que el proceso productivo no requiere agua fresca por encima de la concentración que establece el punto *Pinch* (Khezri et al., 2010; Mohammadnejad et al., 2012).

En este punto, es necesario decidir qué contaminante (único o grupo de contaminantes agregados como DQO o SFT) o contaminantes (múltiples) se deben considerar en el análisis. La alternativa seleccionada debe fundamentarse en el efecto del contaminante en el proceso; mientras, más lo afecte más relevante será incluirlo en el estudio (Rolén, 2015).

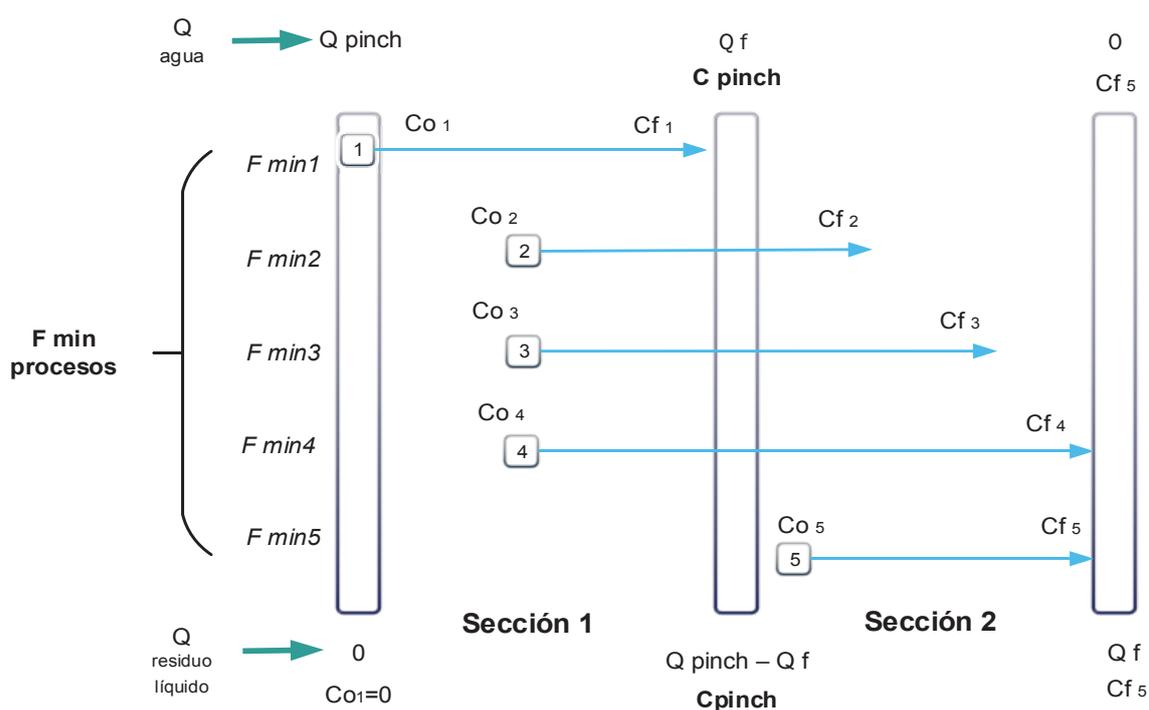
2.4.3.4. Configuración de la red de corrientes líquidas

Posterior a la identificación del flujo mínimo de agua dulce (*Pinch*) se procede a diseñar la red de agua de forma que se alcance el objetivo de consumo, en función de las corrientes líquidas disponibles y de su carga contaminante (Guelli et al., 2011; Mariano et al., 2005).

Kuo y Smith (1998) introdujeron un método sistemático para definir estrategias apropiadas en la síntesis de las corrientes líquidas de un proceso (Hu et al., 2011). En el modelo (Figura 2.9) se expone brevemente, el índice de flujo de agua necesario para lograr la transferencia másica de contaminantes en cada fase analizada (flujos mínimos de agua, F_{min}). Junto con sus respectivas concentraciones máximas de entrada y salida (líneas horizontales) dentro de una cuadrícula de diseño. Esta cuadrícula consta de dos secciones cuyos intervalos de concentración se dividen por la concentración *Pinch*. Adicionalmente, el caudal requerido por cada sección se muestra en la parte superior (agua fresca) e inferior (residuo líquido). A continuación, las diferentes fases de producción se conectan a la red de agua intermedia para satisfacer los requisitos (carga masiva y balance de

masa) de cada operación. Finalmente, una vez alcanzado el flujo mínimo de agua del proceso (determinado en la CCC), se procede a eliminar la cuadrícula resultante, de forma que en el diseño final se denote una red de agua convencional (Kuo y Smith, 1998).

FIGURA 0.9 Cuadrícula de diseño para la configuración de la red de agua



Nota. (C) concentración de un contaminante en mg/L, (Q) caudal en kg/h, (Co) concentración inicial, (Cf) concentración final, (F_{min}) Flujo mínimo de agua fresca de la fase, (Q_{pinch}) caudal mínimo de agua del proceso, (1-5) fase del proceso.

FUENTE: Kuo y Smith (1998)

ELABORACIÓN: Salazar K.

2.4.4. ÍNDICE DE SEGREGACIÓN (Sindex)

El *Sindex* (Índice de Segregación) es una herramienta matemática que refleja la incidencia relativa de una corriente líquida individual a la descarga contaminante total con base en su contribución porcentual al flujo total, y es definido para un parámetro en particular (Soto et al., 1990). Este índice se aplica generalmente para segregar y evaluar los distintos residuos líquidos, procedentes de cualquier

actividad industrial, de forma independiente conforme su nivel de contaminación (Villamar et al., 2016; Rivera et al., 2007). Mediante el cual, es posible revelar las corrientes líquidas con potencial para ser interceptadas y agrupadas respecto a su carga contaminante (Oliver et al., 2008). En consecuencia, permite considerar un tratamiento de residuos líquidos distribuido, que impida la mezcla de las descargas con alta carga contaminante con las de baja carga (Ríos et al., 2011).

2.4.4.1. Carga contaminante

La carga contaminante se refiere a la razón que existe entre la concentración de cualquier tipo de contaminante en un residuo líquido por la unidad de tiempo en que es descargado (García, 2014). Y puede determinarse con base en la Ecuación 2.12.

$$\text{Carga contaminante (CC)} = C \times Q \quad \mathbf{[2.12]}$$

Dónde:

C = concentración del contaminante (mg/L)

Q = caudal de la operación unitaria (L/s)

CAPÍTULO III

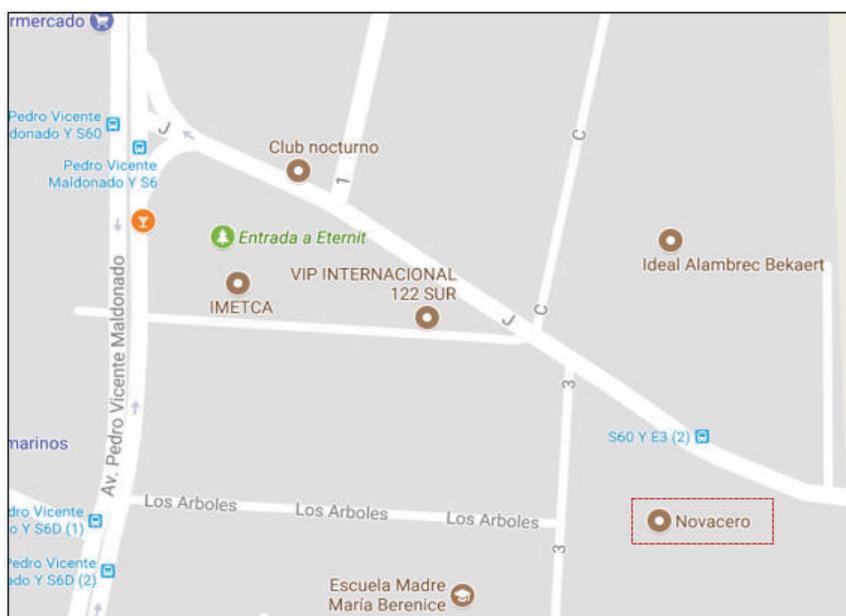
METODOLOGÍA

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

NOVACERO S.A. es una empresa metalmecánica conformada por tres plantas de producción que residen en las ciudades de Quito, Lasso, y Guayaquil; se dedican principalmente a la fundición de metales y elaboración de estructuras en acero, destinadas al sector de la construcción (Novacero S.A., 2018).

El presente estudio, se llevó a cabo en la línea de galvanizado de la Planta Industrial Quito situada en la Panamericana Sur Km 14,5 en el sector del Parque Industrial Turubamba (ver Figura 3.1).

FIGURA 0.1 Mapa de ubicación de la zona de estudio



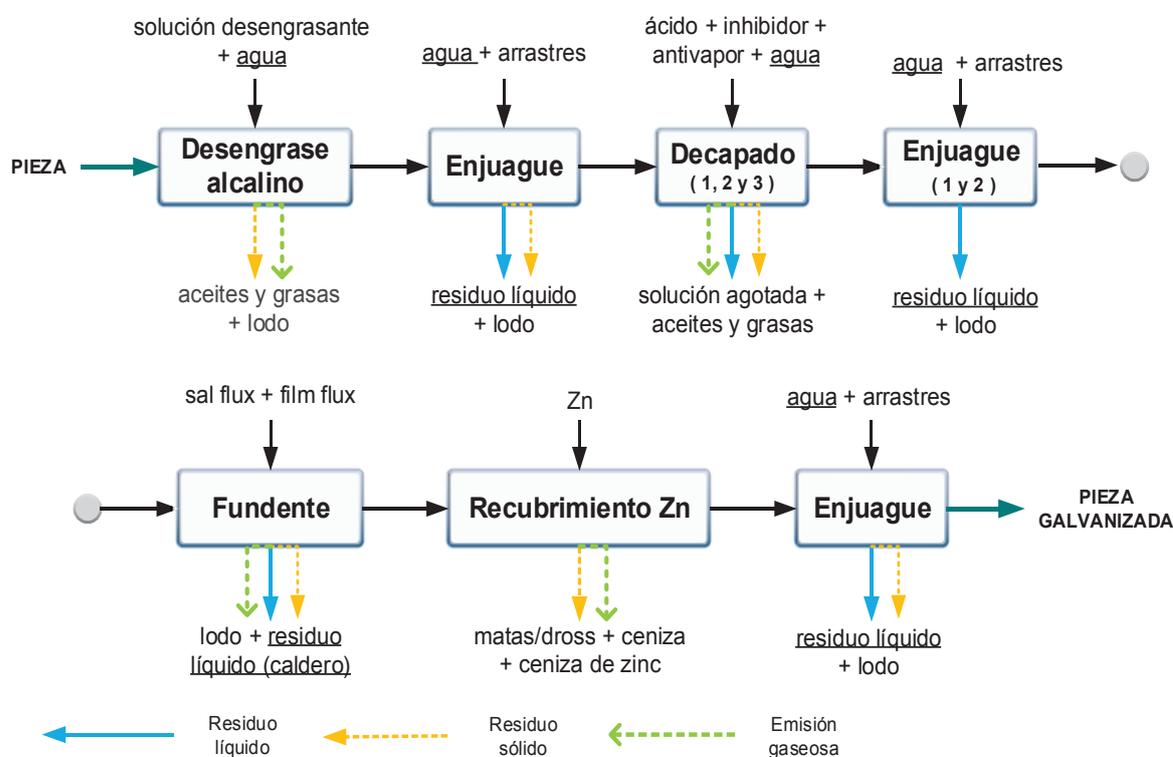
FUENTE: Google Maps

3.1.1. PLANTA INDUSTRIAL DE GALVANIZADO

La planta analizada actualmente procesa piezas metálicas de acero para su recubrimiento con películas de zinc empleando un proceso convencional de

galvanizado en caliente (inmersión de la pieza a $\sim 450^{\circ}\text{C}$) en discontinuo, es decir, lotes de estructuras metálicas de diferente tamaño, cantidad y naturaleza. El proceso productivo integra las fases de desengrase alcalino, enjuague de desengrase, decapado ácido, enjuague de decapado, fundente o fluxado, baño de zinc y enfriamiento. La Figura 3.2 ilustra el diagrama de flujo generalizado del proceso de galvanizado de la planta, así como las diferentes corrientes residuales generadas (residuos líquidos, residuos sólidos, emisiones atmosféricas).

FIGURA 0.2 Esquema simplificado la secuencia del proceso de galvanizado



Nota. () Señala el número de baños que posee la planta en la fase

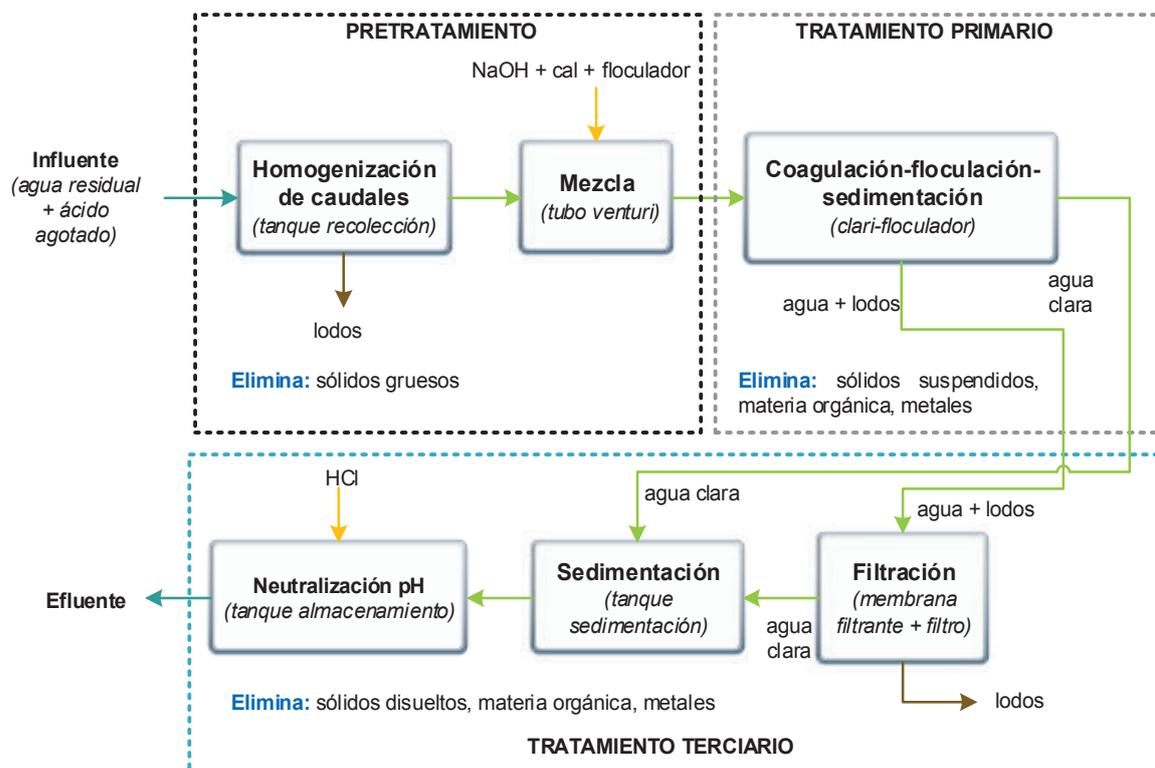
ELABORACIÓN: Salazar K.

3.1.2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS INDUSTRIALES LÍQUIDOS

Los diversos residuos líquidos procedentes de las fases de enjuague, enfriamiento, caldero y decapado agotado son recibidos y tratados en la PT-RILes de la empresa. El tratamiento de estos influentes esquematizado en la Figura 3.3, consta de las etapas de tratamiento: preliminar, primario tipo físico-químico, y terciario. Las operaciones unitarias implicadas comprenden: homogenización de caudal,

mezclado, coagulación-floculación-sedimentación, filtración con membranas y filtro, sedimentación primaria y neutralización del pH.

FIGURA 0.3 Esquema simplificado de la PT-RILes



Nota. () Hace referencia a la tecnología de la operación unitaria

ELABORACIÓN: Salazar K.

3.2. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL

3.2.1. MONITOREO, MUESTREO Y ANÁLISIS ANALÍTICO

3.2.1.1. Muestreo de los residuos líquidos y sólidos

Una visita preliminar (*Anexo No. 1*) se realizó para el reconocimiento de la planta de galvanizado en estudio.

En la visita se establecieron e identificaron los puntos de muestreo del residuo líquido y las distintas corrientes de agua, así como los lodos o residuos semisólidos generados.

Los criterios técnicos definidos para el muestreo del residuo líquido industrial y de los lodos, se resume en la Tabla 3.1.

En forma detallada el *Anexo No. 2* y *Anexo No. 3* presentan la metodología utilizada, tanto para residuos líquidos como sólidos, respectivamente.

TABLA 0.1 Criterios considerados para el muestreo

Muestreo	Criterios considerados
Residuo Líquido	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de muestreo: Manual ▪ Tipo de muestras: Compuestas de volumen constante. <p data-bbox="544 786 1394 972">La muestra compuesta se formó a partir de alícuotas de muestras puntuales, tomando una muestra (500 ml) cada 0,5 m y cada 1 m de profundidad en la parte inicial, media y final del tanque (6 muestras en total). Con un total de 2 repeticiones, a lo largo de la jornada laboral (mañana, medio día, tarde).</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Técnica de preservación: Refrigeración por simple enfriamiento (4°C).
Residuo Semisólido	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de muestreo: Manual ▪ Tipo de muestras: Compuestas <p data-bbox="544 1249 1394 1435">Cada muestra compuesta de lodo, se conformó por muestras puntuales de igual volumen (100 ml), las cuales se tomaron a nivel medio de profundidad para minimizar el sesgo causado por la estratificación de sólidos. Este muestreo fue dividido a lo largo del contenedor del lodo (tanque) en 3 puntos (inicio, medio, fin).</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Técnica de preservación: Refrigeración por simple enfriamiento (4°C).

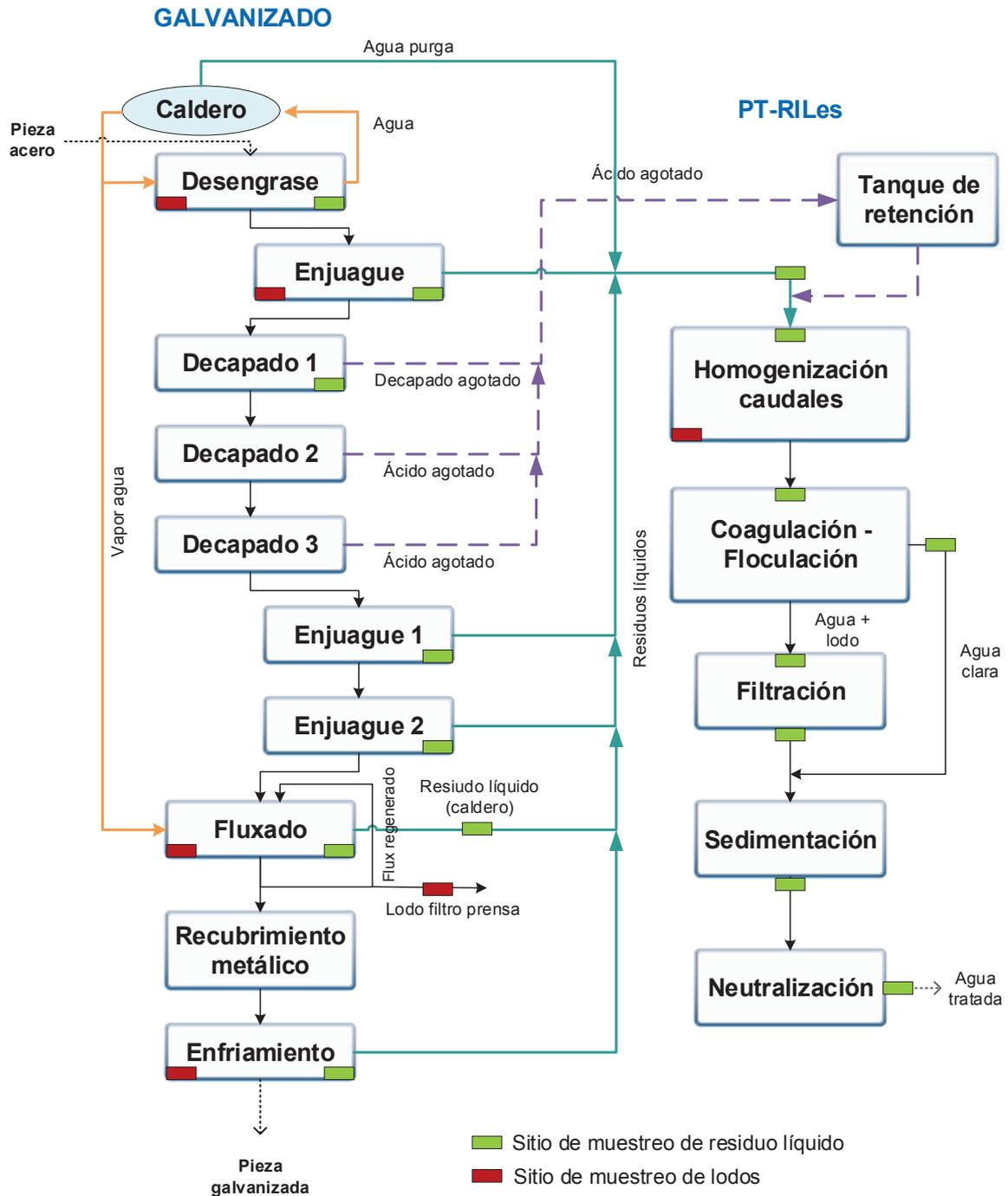
ELABORACIÓN: Salazar K.

3.2.1.2. Ubicación de los puntos de muestreo

Los puntos de control seleccionados para el muestreo del residuo líquido y semisólido, se ubicaron en zonas de fácil acceso, tales como: canales abiertos (tanques). Estos puntos permitieron la introducción de los envases requeridos para la toma de muestras en estado líquido y sólido.

Las muestras en estado líquido, se obtuvieron de 16 puntos y las muestras en estado sólido de 6 puntos, distribuidos tanto en las secciones del proceso como en la PT-RILes (Figura 3.4).

FIGURA 0.4 Puntos de muestreo de residuos líquidos y semisólidos (lodo)



ELABORACIÓN: Salazar K.

3.2.1.3. Identificación de las corrientes líquidas

La Tabla 3.2 presenta las corrientes líquidas del proceso, comprendidas por las corrientes de: agua fresca/regenerada (alimentación), residuos líquidos (vertidos) y soluciones del proceso (baños sin descarga). Estas corrientes fueron identificadas con la siguiente nomenclatura: A (alimentación), V (vertidos), AL (alimentación en las fases de lavado), y VL (vertido del lavado).

Las corrientes que implicaron descarga de residuos líquidos, es decir, enjuagues (VL₁, VL_{2.1}, VL_{2.2}, VL₄), caldero (V₅) y decapados agotados (V_{2.1}, V_{2.2}, V_{2.3}) se diferenciaron de aquellas que permanecen de forma estática en los tanques del proceso (solución desengrasante A₁, solución flux A₃).

Cabe mencionar que la descarga de residuo líquido procedente del caldero (V₅), se genera indirectamente en la fase de fluxado, la cual recibe el vapor de agua desde el caldero y a su salida descarga el agua en estado líquido (mediante un serpentín).

TABLA 0.2 Identificación de las corrientes líquidas del proceso

Proceso	Fase	Identificación	
		A	V
1. DESENGRASE	Desengrase	A ₁	-
	Enjuague	AL ₁	VL ₁
2. DECAPADO	Decapado 1	A _{2.1}	V _{2.1}
	Decapado 2	A _{2.2}	V _{2.2}
	Decapado 3	A _{2.3}	V _{2.3}
	Enjuague 1	AL _{2.1}	VL _{2.1}
	Enjuague 2	AL _{2.2}	VL _{2.2}
	Fluxado	A ₃	-
4. RECUBRIMIENTO METÁLICO	Baño de Zinc	-	-
	Enfriamiento	AL ₄	VL ₄
5. CALDERO	Caldero	A ₅	V ₅
6. PUNTO RECOLECCIÓN	Recolección residuos líquidos	-	V _{6.1}
	Tanque de homogenización	-	V _{6.2}

Nota. (V_{6.1}) Hace referencia al punto de descarga de los residuos líquidos de lavado, VL₁, VL_{2.1}, VL_{2.2}, VL₄ y VL₅ en la PT-RILes, (V_{6.2}) se refiere a la operación de homogenización de caudal de la PT-RILes, donde se unen los residuos de lavado con los residuos de decapado, V_{2.1}, V_{2.2}, y V_{2.3}.

ELABORACIÓN: Salazar K.

3.2.1.4. Caracterización de las corrientes líquidas

Los parámetros seleccionados para cuantificar la carga contaminante de las corrientes líquidas galvánicas se presentan en la Tabla 3.3. Los análisis físico-químicos de las diferentes muestras fueron realizados conforme a la metodología descrita en el *Standard Methods* (APHA-AWWA-WPCF, 2005).

No obstante, parámetros como pH, temperatura y conductividad eléctrica se evaluaron a través del equipo multi-paramétrico Hach HQ11D.

TABLA 0.3 Parámetros físico-químicos analizados para caracterizar las corrientes líquidas del proceso

N°	Parámetros	Unidad	Método	Equipo/Material
1	pH	-	Potenciométrico APHA 4500- H ⁺ pH	pH-metro
2	Temperatura	°C	Medición directa	Termómetro
3	Conductividad (CE)	µcm	Conductometría APHA 2510 B	Conductímetro
4	Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	Método directo	Medidor de OD
5	Sólidos Filtrables Totales (SFT)	mg/L	APHA 2540 C	Crisoles Estufa Balanza analítica
6	Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	APHA 2540 D	Crisoles Estufa Balanza analítica
7	Sólidos totales (ST)	mg/L	APHA 2540 G	Crisoles Estufa Balanza analítica
8	Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	APHA 5220 D	Viales Digestor
9	Amonio (N-NH ₄ ⁺)	mg/L	Nessler Espectrofotométrico	Celdas Espectrofotómetro
10	Zinc (Zn)	mg/L	Colorimétrico APHA 3500 - Zn B	Celdas Espectrofotómetro

Tabla Continuación...

N°	Parámetros	Unidad	Método	Equipo/Material
11	Hierro total (Fe)	mg/L	Colorimétrico APHA 3500 - Fe B	Celdas Espectrofotómetro
12	Cobre (Cu)	mg/L	Espectrofotométrico	Celdas Espectrofotómetro
13	Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	APHA 4500 - Cl B	Bureta Agitador
14	Aceites y grasas (AyG)	mg/L	Gravimétrico APHA 5520 B	Balón de separación Rotavapor Balanza analítica
15	Tensoactivos (detergentes aniónicos)	mg/L	Colorimétrico APHA 5540 C	Balón de separación Celdas Espectrofotómetro

Nota. Tensoactivos medidos como SAAM (Sustancias Activas al Azul de Metileno)

FUENTE: APHA-AWWA-WPCF (2005)

ELABORACIÓN: Salazar K.

3.2.1.5. Monitoreo de caudales de las corrientes líquidas

El monitoreo de caudales de las corrientes líquidas antes señaladas se realizó por medio del método volumétrico. En cada punto de control se tomó una muestra de volumen constante de 10 L, por un periodo de medición de 50 horas en una semana (10 horas diarias), con un intervalo de 2 horas entre cada toma. El procedimiento consistió en recolectar un volumen puntual de muestra y medir el tiempo transcurrido entre el comienzo de la recolección y el retiro del recipiente. La relación de estas dos medidas, como lo indica la Ecuación 3.1 permitió determinar el caudal en ese período.

$$\text{Caudal (Q)} = V/T \quad [3.1]$$

Dónde:

V = volumen del recipiente (L) = 10 (L)

T = tiempo (s)

3.2.1.6. Evaluación de la Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos

El desempeño de la PT-RILes durante la regeneración de los residuos líquidos galvánicos se evaluó a través del monitoreo de las operaciones unitarias que conforman el tratamiento, en 7 puntos de control dispuestos a lo largo del tratamiento, como lo presenta previamente en la Figura 3.4.

Los análisis físico-químicos de las muestras se realizaron respecto a la DQO, ST, SFT, SST, Cl⁻, Zn, Fe, Cu, tensoactivos como SAAM, CE, N-NH₄⁺, pH y temperatura de acuerdo a detallado en la Tabla 3.3.

3.2.1.7. Identificación de los residuos sólidos y semisólidos

La Tabla 3.4 describe los residuos sólidos (siderúrgicos) y semisólidos (lodos) caracterizados así como sus respectivas fases de procedencia. Los residuos sólidos fueron identificadas como: D/M (dross o matas de zinc), y C (ceniza de zinc). Mientras que los residuos semisólidos se identificaron como L (lodo).

TABLA 0.4 Identificación de los residuos sólidos y semisólidos generados

Id	Fase de generación	Descripción
L ₁	Desengrase	Torta deshidratada, color oscuro, olor no ofensivo.
L ₂	Enjuague desengrase	Torta semi-deshidratada, color oscuro, olor no ofensivo.
L ₃	Fluxado (*)	Líquido, color marrón, olor no ofensivo.
L ₄	Fluxado (**)	Polvo seco, color marrón, olor no ofensivo.
D/M	Recubrimiento metálico	Escoria, color gris.
C	Recubrimiento metálico	Agregados polvorientos, heterogéneos e irregulares, color gris.
L ₅	Enfriamiento	Torta semi-deshidratada, color marrón, olor no ofensivo.
L ₆	Punto de recolección	Torta deshidratada, color marrón, olor no ofensivo.

Nota. (*) Lodo generado por la regeneración del baño, (**) Lodo generado por el tratamiento del baño a través de su paso por un filtro prensa

FUENTE: Delvasto et al. (2012)

ELABORACIÓN: Salazar K.

3.2.1.8. Caracterización de los residuos sólidos y semisólidos

La caracterización de los residuos sólidos (matas y cenizas de zinc) y semisólidos (lodos) se obtuvo de reportes obtenidos en la planta. Estos reportes presentan el contenido de hierro (% en peso) y de zinc (%) de los residuos sólidos del proceso. Así como el contenido de óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de silicio (SiO_2), óxido de zinc (ZnO) y cloruros (Cl^-) en el caso de los semisólidos.

En específico, estos últimos se caracterizaron también mediante los parámetros incluidos en la Tabla 3.5.

TABLA 0.5 Parámetros físico-químicos analizados para caracterizar los residuos semisólidos del proceso

N°	Parámetro	Unidad	Método	Instrumentos
1	pH	-	Suspensión y determinación potenciométrica EPA 9045C	Balanza analítica Agitador pH-metro
2	Conductividad (CE)	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Extracto 1:5 y determinación por conductimetría ISO 11265: 1994	Balanza analítica Agitador Conductímetro
3	Sólidos totales (ST)	mg/L	Secado a $105^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$ ISO 11465: 1993.	Crisoles Estufa Balanza analítica
4	Sólidos volátiles (SV)	mg/L	Calcinación APHA 2540E	Crisoles Estufa Balanza analítica

FUENTE: Zagal y Zadzwaka (2007)

ELABORACIÓN: Salazar K.

3.2.2. BALANCE DE MATERIA

La caracterización ambiental del proceso de galvanizado se desarrolló con base en los datos de los flujos de materia respecto a sus entradas (agua y producto químico) y salidas (residuos líquidos, lodos y subproductos). Los datos empleados (284 en total) para los balances de materia del proceso general y cada una de sus fases fueron recopilados de los reportes de inventario de la planta. Estos reportes

muestran los consumos de insumos y generaciones de residuos (en peso) dentro de la línea de galvanizado. Para el análisis se consideró un periodo representativo de 18 meses (enero 2016 - septiembre 2017), con su respectivo seguimiento en los últimos 4 meses (junio 2017 - septiembre 2017). El mencionado seguimiento consistió en visualizar y registrar las cantidades de agua y de productos químicos adicionadas en cada fase y contrastarlos con los reportes de la planta. Posteriormente, se calcularon los valores medios de los datos recolectados. No obstante, los datos que no se ajustaban al valor promedio, es decir, valores demasiado elevados o bajos fueron considerados como valores no representativos por lo que fueron eliminados del análisis ($C_v < 0,35$) (Lorber et al., 2007).

Una vez detalladas y cuantificadas las corrientes de entrada y salida de cada fase del proceso, fue posible describir sus balances de materia. Para lo cual, se tomó como base de cálculo una tonelada de acero galvanizado (1 t_{ag}), con objeto de señalar la cantidad de materia prima/insumo consumido y residuo generado respecto a la unidad productiva.

Las etapas que se requirieron para el análisis de entradas/salidas del proceso, se describen en la Tabla 3.6.

TABLA 0.6 Etapas para el análisis de entradas y salidas del proceso

Etapa	Actividad
<i>Análisis preliminar</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fases productivas ▪ Diagrama de flujo del proceso
<i>Balances de Materia</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Medición de las entradas del proceso ▪ Registro del uso del agua ▪ Nivel actual de reutilización de residuos ▪ Medición de las salidas del proceso (corrientes residuales) ▪ Inventario de residuos sólidos ▪ Balances de materia (entradas y salidas) ▪ Evaluación de los balances de materia
<i>Síntesis</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alternativas de reducción en origen ▪ Segregación

FUENTE: Lorber et al. (2007)

3.2.2.1. Balance de materia por fase de producción

El balance de masa de las fases de producción que consumen agua se definió considerando que los insumos (entrada) y residuos generados (salida y generación) poseen directa correspondencia con la Ley de la Conservación de la Materia. De esta forma la materia no se pierde sólo se transforma o transfiere. Por esta razón, una proporción del insumo químico (entrada) utilizado en cada fase producirá residuos líquidos (salida) por la transferencia de carga contaminante al agua y la proporción restante generará residuos semisólidos (generación por reacción). En particular para la fase de recubrimiento metálico (sin consumo de agua) se ha considerado que, la materia prima únicamente se transforma en residuos siderúrgicos (matas y cenizas de zinc) acompañado por emisiones de vapores metálicos, no cuantificados en este estudio.

3.2.2.2. Balance de materia general

Los flujos de entradas y salidas del proceso de galvanizado de forma global, se obtuvieron por medio de la síntesis de los balances realizados previamente para cada fase del proceso.

- *Índices de consumo de agua y sustancias químicas*

El consumo de agua total dentro del proceso se expresó en L/t_{ag} , para proporcionar una referencia del valor del mismo se ha considerado la relación que existe entre el caudal de las fases demandantes de agua y el tiempo de operación de cada una de ellas. Mientras que para la cuantificación del consumo de sustancias químicas, expresado en kg/t_{ag} , se utilizaron los valores mensuales de los consumos de insumos químicos del inventario de la planta, respecto a la producción en el mismo periodo de tiempo.

- *Índices de generación de residuos líquidos y sólidos*

Como se ha mencionado, la Ley de la Conservación de la Materia conduce al hecho de que las sustancias químicas utilizadas en el proceso productivo se transforman

tanto en residuos líquidos como sólidos. Por tanto, la generación de residuos se ha fundamentado en este principio. En el caso de los residuos en estado semisólido (lodos), su aproximación se realizó con base en un mantenimiento general (septiembre 2017) de los baños de las etapas operativas de pre-tratamiento y post-tratamiento. En el cual se extrajeron y pesaron (en húmedo) los lodos de cada fase. Posteriormente, se vincularon a razón de su periodo de generación, es decir, la fecha de mantenimiento previo. Respecto a los residuos líquidos su deducción estuvo directamente vinculada con el consumo de agua fresca en las fases con descarga en la PT-RILes, exceptuando de su valor las pérdidas de agua por arrastre, fuga o evaporación.

Los valores obtenidos tanto de consumo como de generación, en función de la unidad producida, fueron comparados con los valores bibliográficos de referencia existentes, con el fin de definir la situación actual de la planta.

3.3. APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

3.3.1. METODOLOGÍA WATER PINCH

3.3.1.1. Curva Compuesta de Concentraciones

Esta investigación se basa en el método de Wang y Smith (1994) considerando contaminantes únicos en la metodología gráfica. En el método, se especificó la Curva Compuesta de Concentraciones (CCC) respecto a cuatro fases del proceso que presentaron un alto índice de consumo de agua. Las cuales comprendieron a: enjuague desengrase (VL_1), enjuague decapado 1 ($VL_{2.1}$), enjuague decapado 2 ($VL_{2.1}$) y enfriamiento (VL_4). Los parámetros contaminantes clave seleccionados para los residuos líquidos galvánicos fueron: SFT (Sólidos Filtrables Totales), Zn (Zinc) y DQO (Demanda Química Orgánica). Estos parámetros se analizaron por separado y la cantidad mínima de agua fresca requerida por las operaciones se calculó para todos ellos.

Previo a la elaboración de la aproximación gráfica, se realizaron las siguientes suposiciones sobre el proceso de galvanizado:

- a) Los residuos líquidos procedentes de las fases definidas para el análisis correspondieron a operaciones de lavado. Por ende, están controladas por la calidad del residuo (no cantidad) y pueden modelarse como unidades con transferencia de masa (Wan Alwi y Manan, 2013; Hallale y Fraser, 1998; Prakash y Shenoy, 2005).
- b) El flujo de cada corriente es constante a medida que pasa a través de la fase, en consecuencia solo existen cambios en la concentración de los contaminantes (Oliver et al., 2008). La pérdida o ganancia de agua en cada operación o en la unidad de regeneración es ignorada (Yang et al., 2000).
- c) La carga contaminante o másica en cada fase se mantiene constante (Prakash y Shenoy, 2005).
- d) La concentración de salida de cada fase es igual a la concentración máxima de salida ($C_{i,sal} = C_{i,sal}^{m\acute{a}x}$) (Prakash y Shenoy, 2005).
- e) La concentración de entrada corresponde a la concentración máxima de entrada ($C_{i,ent} = C_{i,ent}^{m\acute{a}x} = X_{i,r}C_o/X_{i,r}$).

En el análisis, la carga contaminante (Δm_i) transferida se calculó en referencia a la Ecuación 3.2 (Guelli et al., 2011; Mohammadnejad et al., 2012).

$$\Delta m_i = F_i \times (C_{i,sal}^{m\acute{a}x} - C_{i,ent}^{m\acute{a}x}) \quad [3.2]$$

Dónde:

F_i = caudal de agua fresca que ingresa en la fase i, en m³/h.

$C_{i,ent}^{m\acute{a}x}$ = concentración máxima de entrada de la fase i, en mg/L.

$C_{i,sal}^{m\acute{a}x}$ = concentración máxima de salida de la fase i, en mg/L.

- *Caudal mínimo de agua dulce en una red de corrientes líquidas sin reúso de residuos líquidos*

El valor de la tasa mínima de flujo de agua dulce (cuando $C_{i,ent} = 0$) que requiere cada fase, en una red de corrientes líquidas sin reúso de residuos líquidos, se encontró a través de la Ecuación 3.3 señalada por Khezri et al. (2010).

$$f_{i,\min} = \frac{\Delta m_i}{C_{i,\text{sal}} - C_{i,\text{ent}}} \times 1000 \quad [3.3]$$

Dónde:

$f_{i,\min}$ = caudal mínimo de agua fresca necesaria para la fase i, en m³/h.

- *Caudal mínimo de agua dulce en una red de corrientes líquidas con reúso de residuos líquidos*

Una vez establecidos los requisitos de agua dulce para la red de corrientes líquidas sin reutilización de agua, se llevó a cabo la integración de las fases productivas demandantes de agua proceso (Mann y Liu, 1999). Para ello, inicialmente se obtuvo el flujo óptimo de agua fresca dentro del proceso, con el inverso de la pendiente del Punto *Pinch* de la Curva Compuesta de Concentraciones (Dakwala et al., 2011). De acuerdo con la Ecuación 3.4.

$$f_{\min} = \frac{\Delta m_{\text{pinch}}}{C_{\text{pinch}}} \times 1000 \quad [3.4]$$

Dónde:

f_{\min} = caudal mínimo de agua fresca necesario para el proceso, en m³/h.

Δm_{pinch} = transferencia de masa en el punto *Pinch*, en mg/h.

C_{pinch} = concentración del contaminante en el punto *Pinch*, en mg/L.

Después, el valor más elevado del flujo mínimo se consideró como el caudal mínimo objetivo en la red de corrientes líquidas (Mohammadnejad et al., 2011). Con base en la Ecuación 3.5.

$$f_{\min} = \text{máx} \{ f_{\min \text{ SFT}}, f_{\min \text{ Zn}}, f_{\min \text{ DQO}} \} \quad [3.5]$$

3.3.1.2. Configuración de la red de residuos líquidos

El sistema de asignación de agua para la red de corrientes líquidas se diseñó con base en el modelo presentado por Kuo y Smith (1998). La modificación al modelo, fue dada por la forma de determinación de los caudales mínimos o limitantes. En

este estudio, los mismos correspondieron a los flujos de agua (residuo líquido), medidos en el monitoreo de caudales. Esta premisa, se tomó debido a que la concentración inicial del agua regenerada en la PT-RILes utilizada en las fases operativas evaluadas fue diferente de cero ($C_o = C_{ent} \neq 0$), en todos los contaminantes seleccionados. Adicionalmente, para la aproximación del reciclaje del residuo líquido regenerado se consideró el caudal real (incluyendo pérdidas) a la entrada de la planta de tratamiento. Por lo tanto, a diferencia de trabajos anteriores en este ámbito, la cantidad de agua no se recicla totalmente (Mohammadnejad et al., 2011).

Por otra parte, para definir el caudal requerido por cada fase operativa se mantuvo fija la actual carga contaminante transferida al agua fresca de lavado en la operación. Las interconexiones de la red de residuos líquidos se ajustaron por medio de la mezcla del caudal de agua fresca y/o regenerada junto con el caudal del residuo líquido reusado directamente, de manera que se satisfagan dicha carga sin transgredir el balance de masa. Los residuos líquidos se conectaron a la red considerando como caudal objetivo al valor de flujo mínimo de agua dulce obtenido de la Ecuación 3.5.

3.3.2. ÍNDICE DE SEGREGACIÓN (*Sindex*)

3.3.2.1. Aplicación del *Sindex*

El *Sindex* (Índice de Segregación) fue definido para los residuos líquidos derivados de las fases de: enjuague ($VL_1, VL_{2.1}, VL_{2.2}$), enfriamiento (VL_4), caldero (V_5) y decapado agotado ($V_{2.1}, V_{2.2}, V_{2.3}$). Los 3 tipos de parámetros considerados fueron: *orgánicos* (DQO, $N-NH_4^+$, A y G), *inorgánicos* (Fe, Zn, Cu y Cl^-) e *híbridos* (SAAM) bajo dos escenarios. En el primer escenario, se consideraron las cargas contaminantes de las corrientes de líquidas de enjuague, enfriamiento y caldero (5 corrientes líquidas de la línea de galvanizado). Cuando las mismas son recolectadas en la PT-RILes de la empresa ($pH_{descarga\ global} \leq 4,5$) sin dosificación del decapado agotado. Mientras que, en el segundo escenario fueron considerados las corrientes antes mencionadas ($pH_{descarga\ global} > 4,5$) incluyéndose también los baños de decapado agotados (8 corrientes líquidas de la línea).

La aproximación del *Sindex* se encontró por medio de la Ecuación 3.6.

$$S_{\text{index}} = \%CC - \%F \quad [3.6]$$

Dónde:

%CC = incidencia de la corriente individual al total de carga contaminante en el flujo general.

%F = incidencia porcentual la corriente individual al flujo total.

Los resultados obtenidos para ambos escenarios, permitieron determinar un valor promedio del índice para cada flujo individual. A partir, de este valor y en función de lo expuesto por Rivela et al. (2004) se dirimieron entre dos tipos de corrientes líquidas:

- *Corrientes Tipo I*, definidas como un residuo líquido con alta carga, con un $S_{\text{index}} > 0$. En consecuencia, reflejaron la potencial necesidad de un tratamiento de regeneración total.
- *Corrientes Tipo II*, especificado como un residuo líquido con baja carga, y un $S_{\text{index}} < 0$. Denotaron la necesidad de tratamiento menor o intermedio para su regeneración.

3.3.2.2. Tratamiento diferenciado de los influentes de la Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos

Las oportunidades de tratamiento diferenciado para los residuos líquidos definidos como corrientes tipo I y tipo II se determinaron en función de las eficiencias de eliminación de los parámetros contaminantes antes detallados, estimadas en cada operación unitaria que compone la PT-RILes. Además, se recopiló información bibliográfica relacionada a los criterios de tratabilidad que rigen estas operaciones. Ambos aspectos se compararon para precisar las operaciones óptimas para la regeneración de las corrientes tipo I y II, sin proponer tecnologías adicionales a las existentes en la planta de tratamiento. En general, la selección de las tecnologías definidas para el tratamiento estuvo en función de aplicabilidad técnica (instalaciones), la simplicidad y efectividad de tratamiento.

3.4. ESCENARIOS PARA EL MODELAMIENTO DE LA RED DE CORRIENTES LÍQUIDAS

3.4.1. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS

En este trabajo se exploraron una serie de escenarios para ilustrar la red de corrientes líquidas de la industria en estudio, tomando en cuenta tres estrategias, cuyas variantes consideraron diferentes objetivos para producir soluciones óptimas.

3.4.1.1. Escenario I: Flujo mínimo de agua

En el primer escenario, el diseño de red de corrientes líquidas tuvo como función objetivo el mínimo consumo de agua fresca, encontrado por el método *Water Pinch* para las fases de enjuague y enfriamiento. Por ende, se tomó en cuenta la disposición propuesta por este método para el máximo reúso los residuos líquidos de las fases operativas mencionadas. Por otro lado, respecto a la asignación de agua fresca/regenerada para el resto de corrientes, es decir, caldero, baños de flux y desengrase, se consideró en el diseño su actual tasa de consumo de agua. La incidencia del reúso de los residuos líquidos se comparó con el porcentaje actual de reúso de la planta industrial y se estimó además el ahorro económico asociado al tratamiento de un menor volumen de residuo líquido generado, entre otros aspectos.

3.4.1.2. Escenario II: Tratamiento diferenciado de residuos líquidos

Este escenario abordó y evaluó el criterio de segregación de residuos líquidos para un posible tratamiento diferenciado de acuerdo a su carga contaminante. Para ello, los residuos líquidos se agruparon a partir a los resultados determinados por el *Sindex*. De esta forma, las corrientes tipo II (baja carga) se derivaron a unidades de tratamiento de PT-RILes que permitan teóricamente eliminar entre 60 a 90% de la carga contaminante requerida para su reúso en una fase diferente del proceso industrial de galvanizado. De acuerdo a las características físico-químicas de las corrientes altamente cargadas (tipo I) se propuso la continuidad del proceso de tratamiento actual para su regeneración. El análisis incorporó, las ventajas

ambientales por el no consumo de insumos de productos químicos y energía eléctrica utilizados en el tratamiento, y económicas vinculadas con los costos operativos evitados en la PT-RILes luego del sistema de segregación de residuos líquidos.

3.4.1.3. Escenario III: Flujo mínimo de agua y tratamiento diferenciado de residuos líquidos

El enfoque de este último escenario, consideró simultáneamente la disminución del consumo de agua dulce por la intercepción y el reúso de residuos líquidos, así como la regeneración selectiva de residuo líquido utilizada en reciclaje. Este objetivo al igual que en los anteriores escenarios presentó costo operativos evitados en la PT-RILes, por el no consumo de energía y productos químicos utilizados en el tratamiento.

3.4.2. COMPARACIÓN DE ESCENARIOS

Los criterios utilizados para comparar los diferentes escenarios fueron la incidencia porcentual de los siguientes aspectos:

- *Reciclaje del agua*, determinado como el caudal de residuos líquidos regenerados en la PT-RILes que se incorpora nuevamente en el proceso productivo.
- *Minimización del requerimiento de agua fresca/regenerada y de la descarga de residuo líquido*, medido como la diferencia entre la tasa de consumo de agua actual en la planta industrial y la tasa de consumo de agua con reúso de residuos líquidos.
- *Disminución del consumo de productos químicos utilizados en la depuración de residuos líquidos*, vinculada con el no consumo de insumos químicos (agentes acondicionadores de pH y coagulantes) en las corrientes líquidas tipo II. Y con el consumo de insumos evitado debido a la menor generación de residuos líquidos a tratar.

- *Diminución del costo total del tratamiento regenerativo*, definidos por el costo operativo evitado por el no consumo de insumos químicos y energía en la PT-RILes.
- *Emisiones de gases efecto invernadero evitadas*, definidos por el no consumo de agua (flujo mínimo de agua fresca/regenerada) y energía (no requerida en tratamiento de las corrientes tipo II).

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL

4.1.1. BALANCE DE MATERIA POR FASE DE PRODUCCIÓN

A continuación, las Figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 detallan el flujo de materia (entradas/salidas) de cada operación del proceso de galvanizado.

Las entradas consideran el ingreso de materiales (materia prima, productos químicos y agua) y las salidas las descargas líquidas y sólidas referidas a su unidad productiva, 1 tonelada de acero galvanizado (1 t_{ag}).

4.1.1.1. Desengrase

En la fase de Desengrase (Figura 4.1), el consumo de agua fue de 938,1 L/ t_{ag} , del cual el 5% (41,6 L/ t_{ag}) correspondió al consumo por nivelado de la columna de agua en el baño, debido a la evaporación. El valor de agua adicionada reportado en este estudio, se encuentra por encima del rango (< 20 L/ t_{ag}) descrito por bibliografía (CE, 2006). Alrededor de 859,9 L/ t_{ag} (96%) del agua de enjuague se transformó en residuo líquido, caracterizado por la potencial presencia de residuos del material desengrasante utilizado (aceites y grasas).

En esta fase, cerca del 69% (0,14 kg/ t_{ag}) del aditivo desengrasante y residuo sólido suspendido del agua se transformaron en lodo. El consumo de desengrasante en este estudio (0,14 kg/ t_{ag}) fue menor al reportado por plantas de galvanizado a nivel sudamericano (0,6 a 1,5 kg/ t_{ag}) (ASIMET y CPL, 2014). No obstante, la cantidad de lodo generado (0,21 kg h/ t_{ag}) estuvo dentro del rango de valores reportados (0,16 - 0,18 kg/ t_{ag}) (CE, 2006).

4.1.1.2. Decapado

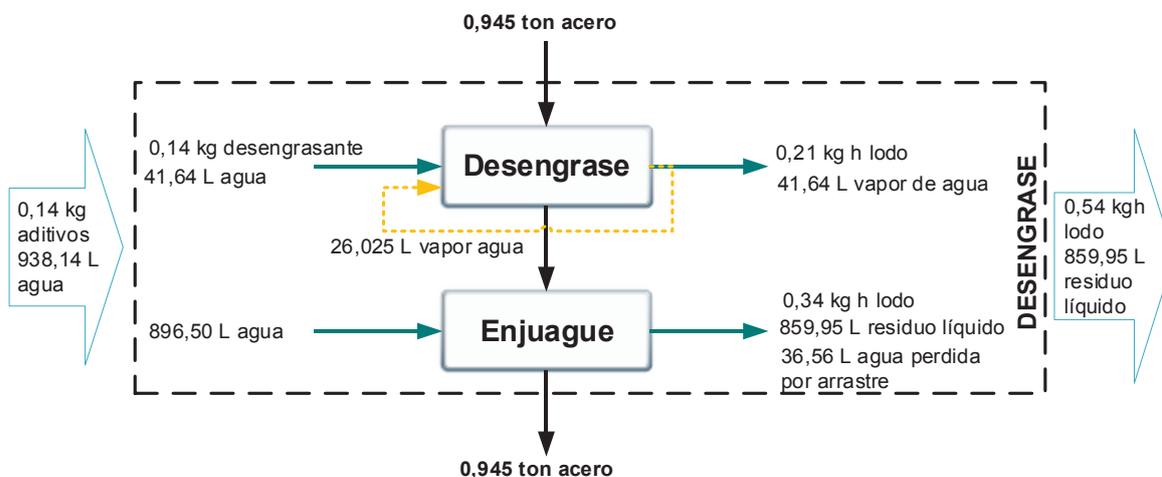
La fase de Decapado (Figura 4.2), requirió una tasa de agua igual a 1162,5 L/t_{ag} que posteriormente se descargó como residuo líquido a razón de 1136,6 L/t_{ag} (92%). Este residuo líquido, caracterizado por su probable contenido de metales desprendidos del acero (Fe como elemento predominante), se conformó por los flujos de enjuague así como del baño de decapado agotado. El porcentaje restante del total de agua suministrada (8%) correspondió a las pérdidas por el arrastre del agua entre cada operación de lavado de las piezas metálicas, cuando estas se trasladan mecánicamente de un baño a otro.

Adicionalmente, el consumo de agua en los baños de decapado (16,9 L/t_{ag}) necesario para la reposición (ajuste en la composición) de un ácido nuevo se enmarca dentro del rango (1-35 L/t_{ag}) comúnmente señalado (CE, 2006).

En otro aspecto, esta fase se caracterizó por presentar un elevado índice de consumo de ácido decapante (34,8 kg/t_{ag}) respecto a los valores de referencia presentados en estudios previos (20 a 30 kg/t_{ag}) (ASIMET, 2013; CE, 2006; Kong y White, 2010). El agente decapante en promedio se transfirió alrededor de un 55% (11,5 L/t_{ag}) al residuo líquido (baño agotado) generado. El baño agotado, es decir, la solución ácida consumida o gastada por los metales disueltos en la misma (Frías y Pérez, 1998), denota una generación (64,2 kg/t_{ag}) cercana a lo señalado en estudios previos (68-72 kg/t_{ag}) (González et al., 2015). Esta condición de la planta, confirmó que uno de los principales residuos procedentes del galvanizado es el ácido del decapado (Stocks et al., 2005).

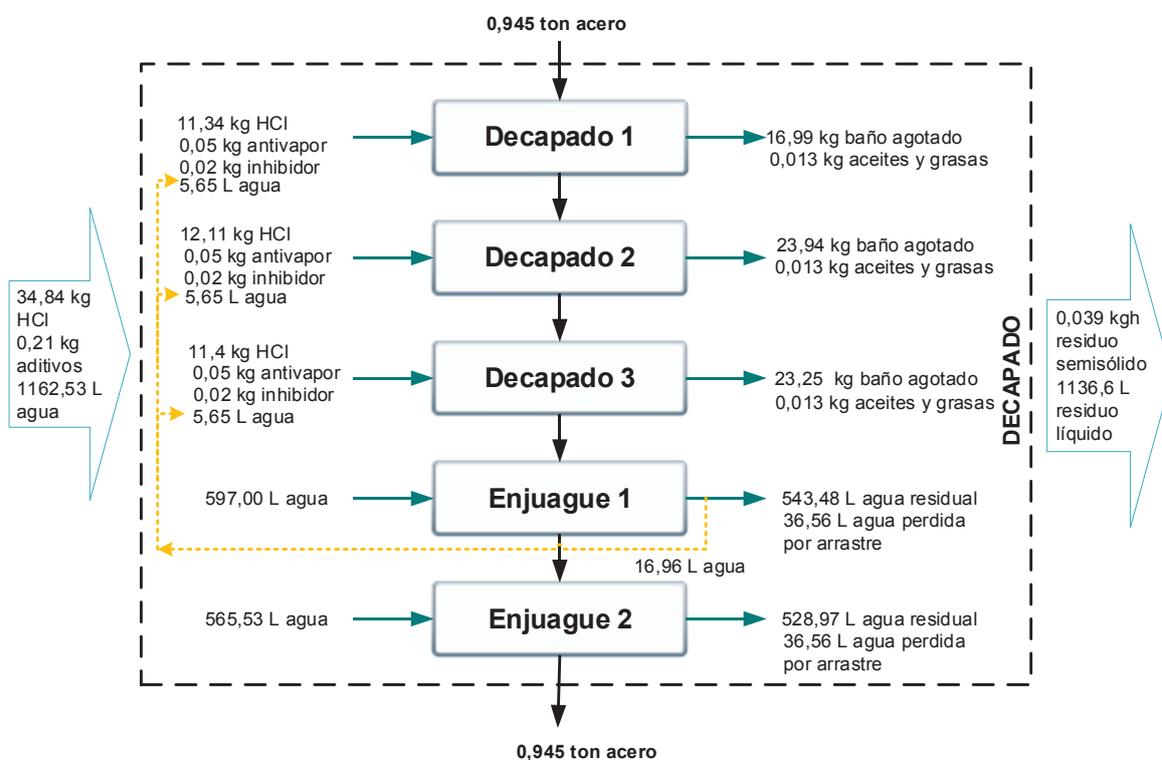
Respecto a los aditivos adicionados en esta fase, la razón del consumo del agente que inhibe el ataque excesivo del ácido sobre la superficie de la pieza (0,06 kg/t_{ag}) fue significativamente inferior al nivel comúnmente referenciado (0,18 kg/t_{ag}). No obstante, el consumo de antivapor (0,15 kg/t_{ag}), reductor de las emisiones de gases clorados, es semejante al valor citado para el nivel de consumo de ácido de la planta (0,20 kg/t_{ag}) (ASIMET y CPL, 2014).

FIGURA 0.1 Flujo de materia por unidad productiva (t_{ag}) en la fase de desengrase



Nota. (Línea amarilla) Indica recirculación en la misma etapa
ELABORACIÓN: Salazar K.

FIGURA 0.2 Flujo de materia por unidad productiva (t_{ag}) de la fase de decapado

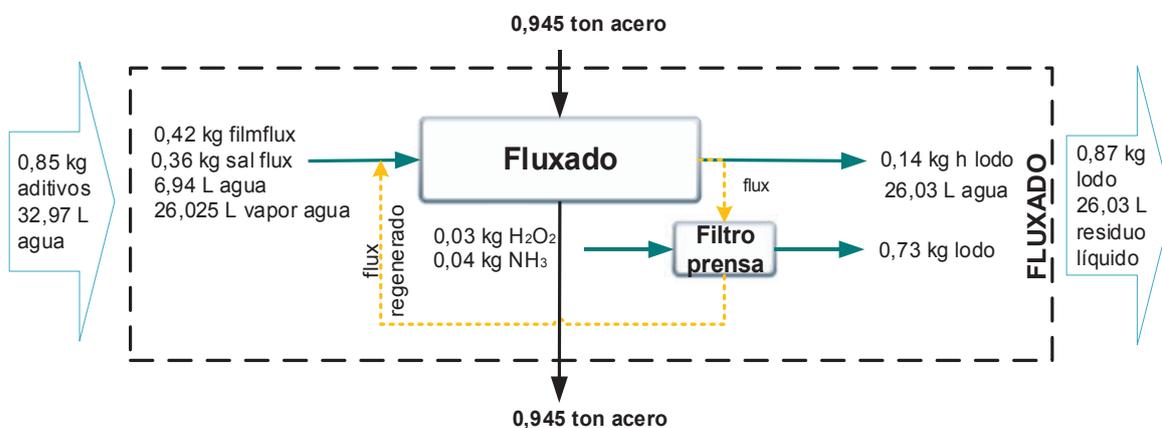


Nota. (Línea amarilla) Indica recirculación del residuo líquido del enjuague 1 hacia el decapado para la elaboración de un nuevo baño decapante
ELABORACIÓN: Salazar K.

4.1.1.3. Fluxado o fundente

La fase de Fluxado (Figura 4.3) presentó un consumo de agua próximo a los 32,9 L/t_{ag}, en comparación con trabajos previos, este valor estuvo por encima del rango referenciado (0-20 L/t_{ag}) (CE, 2006). Aproximadamente el 79% (26,1 L/t_{ag}) del mismo, se transformó en residuo líquido, el cual comprendió básicamente al agua condensada por efecto de la transferencia de calor hacia el baño. No obstante, el valor encontrado en este estudio para este efluente fue similar al reportado (0-20 L/t_{ag}) (CE, 2006). En particular, en esta fase se evidenció un consumo de sal flux, cloruro de amonio y cloruro de zinc, (0,36 kg/t_{ag}) considerablemente inferior al valor establecido en la literatura (3 kg/t_{ag}). El total de los aditivos utilizados (0,85 kg/t_{ag}) correspondió al 97% de los lodos generados (0,87 kg/t_{ag}). Estos residuos semisólidos compuestos principalmente por hidróxidos de hierro tuvieron una generación cercana a los referenciales (1 kg/t_{ag}) (González et al., 2015).

FIGURA 0.3 Flujo de materia por unidad productiva (t_{ag}) de la fase de fluxado



Nota. (Línea amarilla) Indica la recirculación de la solución de fluxado luego de ser regenerada

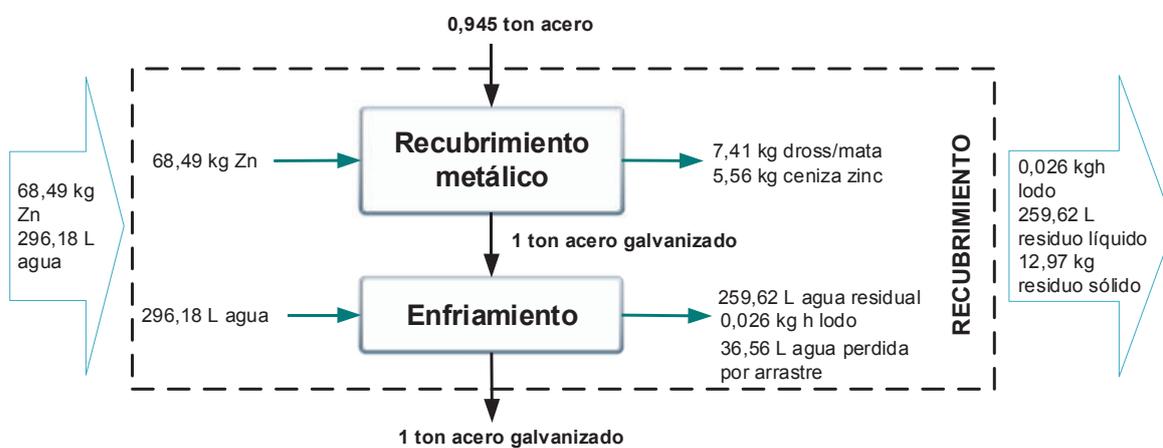
ELABORACIÓN: Salazar K.

4.1.1.4. Recubrimiento metálico

Los flujos de entrada/salida dentro de la fase de recubrimiento metálico (Figura 4.4), reflejan una demanda de agua igual a 296,2 L/t_{ag}, lo cual se ajusta a una generación de residuo líquido del orden del 88% (259,6 L/t_{ag}). El consumo de zinc promedio

(68,5 kg/t_{ag}) fue similar al reportado por plantas de galvanizado con igual tecnología (52 a 87 kg/t_{ag}) (ASIMET, 2013; CE, 2006; Kong y White, 2010). La incorporación efectiva del zinc al acero pre-tratado fue del 81% (55,9 kg/t_{ag}). Por lo tanto, el 19% (12,9 kg/t_{ag}) del valor no se impregnó a la pieza metálica, transformándose en residuos sólidos ricos en zinc. La cantidad de residuos siderúrgicos (matas y cenizas) registró un valor inferior (27,4 kg/t_{ag}) al reportado por González et al. (2015).

FIGURA 0.4 Flujo de materia por unidad productiva (t_{ag}) en la fase de recubrimiento metálico



ELABORACIÓN: Salazar K.

4.1.2. BALANCE DE MATERIA GLOBAL

La Figura 4.5 detalla el balance de materia general del proceso de galvanizado. La entrada de 2477 L/t_{ag} de agua generó a la salida de 2286 L/t_{ag}, con pérdidas del 8% debido a evaporación o fuga. La cantidad de agua utilizada en esta industria generalmente oscila entre 100 a 3000 L/t_{ag} (ASIMET y CPL, 2014; Kong y White, 2010; Tahir y Rauf, 2004). El mayor aporte de materia prima para el proceso productivo de galvanizado fue el zinc, con un nivel de consumo medio de 68,5 kg/t_{ag}. Este valor está dentro del rango (52 – 87 kg/t_{ag}) reportado por industrias de este rubro (ASIMET y CPL, 2014; CE, 2006). De acuerdo con lo mencionado, la adherencia efectiva de zinc a las piezas metálicas estuvo en torno al 81%, quedando el restante disuelto o suspendido en el agua de cada fase del proceso.

En el procesado de cada tonelada de acero galvanizado fue necesario alrededor de 36 kg de aditivos químicos, valor vinculado principalmente a la sustancia decapante (HCl). Finalmente, las descargas semisólidas ascendieron a 1,4 kg/t_{ag}.

FIGURA 0.5 Flujo de materia proceso de galvanizado



ELABORACIÓN: Salazar K.

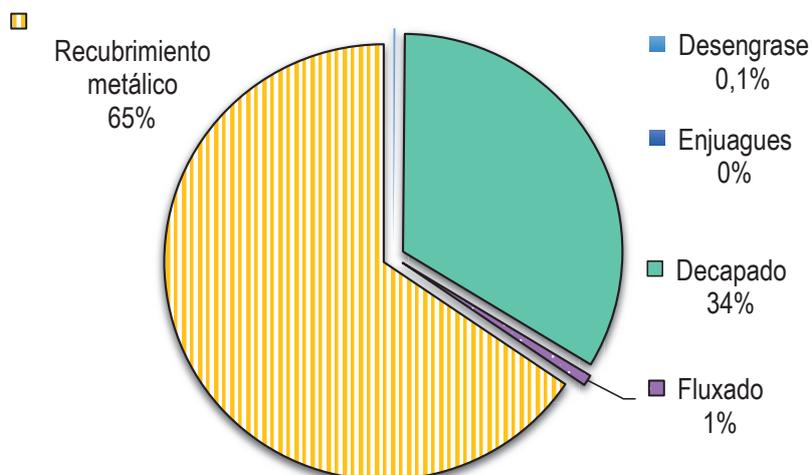
4.1.2.1. Consumo de productos químicos

La Tabla 4.1 y Figura 4.6 detallan el consumo medio de productos químicos incluyendo el zinc. Este consumo fue del orden de 104,5 kg/t_{ag}. Las fases con mayor consumo de insumos químicos fueron recubrimiento metálico (68,5 kg/t_{ag}) y decapado (35,1 kg/t_{ag}) que alcanzaron casi el 99% del consumo. Mientras que, el menor consumo de insumos químicos estuvo en la fase de desengrase (0,14 kg/t_{ag}) que no superó el 0,1%.

TABLA 0.1 Consumo de productos químicos por fase (en kg/t_{ag})

Fase	Productos químicos (kg /t _{ag})
Desengrase	0,14
Decapado	35,05
Fluxado	0,85
Recubrimiento metálico	68,49
Enjuagues	0
Total	104,53

ELABORACIÓN: Salazar K.

FIGURA 0.6 Consumo de productos químicos por fase (en %)

ELABORACIÓN: Salazar K.

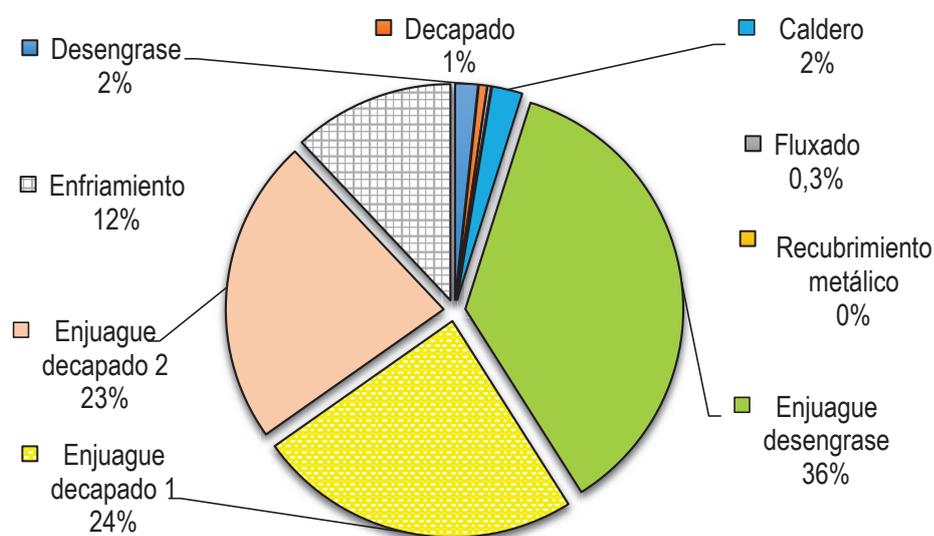
4.1.2.2. Consumo de agua fresca

La Tabla 4.2 y Figura 4.7 presentan la distribución del consumo de agua entre cada fase del proceso. El tratamiento superficial de piezas de acero se caracterizó por su elevado consumo de agua (2476,6 L/t_{ag}). Alrededor del 95,1% (2355,2 L/t_{ag}) de este costo estuvo asociado directamente a las operaciones de lavado de las piezas; mientras que, el consumo por cada proceso fue prácticamente despreciable (4,9%). De esta forma, la demanda de agua en la fase de fluxado tuvo la menor incidencia con un valor cercano al 0,3% (6,9 L/t_{ag}).

TABLA 0.2 Consumo de agua por fase (en kg/t_{ag})

Fase	Consumo agua (kg /t _{ag})
Desengrase	41,64
Enjuague desengrase	896,50
Decapado	16,96
Enjuague 1	597,00
Enjuague 2	565,53
Fluxado (nivelación)	6,94
Recubrimiento metálico	0
Enfriamiento	296,18
Caldero	55,89
Total	2476,64

ELABORACIÓN: Salazar K.

FIGURA 0.7 Consumo de agua por fase (en %)

ELABORACIÓN: Salazar K.

4.1.2.3. Generación de residuos líquidos

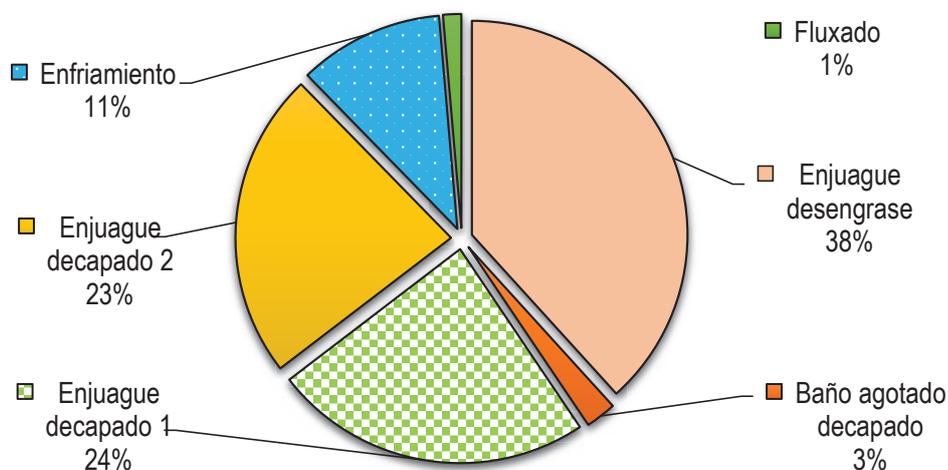
La Tabla 4.3 y Figura 4.8 exponen la generación de residuos líquidos a lo largo del proceso productivo.

Las fases que incurrieron en la generación de residuos líquidos fueron enjuague y enfriamiento con un valor superior al 95,9% (2192 L/t_{ag}) de la descarga global (2286 L/t_{ag}). En contraste, la descarga menos representativa correspondió al agua de salida de la fase de fluxado con un valor del 1% (29,8 L/t_{ag}).

TABLA 0.3 Generación de residuo líquido por fase (en kg/t_{ag})

Fase	Residuos líquidos (kg /t _{ag})
Enjuague desengrase	859,94
Baño decapado agotado	64,15
Enjuague 1	543,48
Enjuague 2	528,97
Enfriamiento	259,62
Fluxado (caldero)	29,86
Total	2286,03

ELABORACIÓN: Salazar K.

FIGURA 0.8 Generación de residuo líquido por fase (en %)

ELABORACIÓN: Salazar K.

4.1.2.4. Generación de residuos sólidos y semisólidos

La Tabla 4.4 y la Figura 4.9 señalan las cantidades y porcentajes de generación de residuos sólidos y semisólidos, por fases. Los residuos con contenido de zinc (matas y ceniza) procedentes de la fase de recubrimiento fueron los residuos más representativos dentro del proceso de galvanizado con 90% (12,9 kg/t_{ag}) del total de residuos. No obstante, entre el 80 al 90% de la ceniza represa a las fases de fabricación de acero, y entre el 85 al 90% de las matas son comercializadas en otras actividades productivas (Lobato et al., 2015). Los residuos semisólidos de las fases de enfriamiento (lodo) y decapado (aceites y grasas) no alcanzaron el 0,5% (0,06 kg/t_{ag}).

TABLA 0.4 Generación de residuos sólidos por fase (en kg/t_{ag})

Identificación	Fase	Residuo sólido (kg /t _{ag})
L ₁	Desengrase	0,21
L ₂	Enjuague	0,34
L ₃	Fluxado (*)	0,14
L ₄	Fluxado (**)	0,73
L ₅	Enfriamiento	0,03
A y G	Decapado	0,04

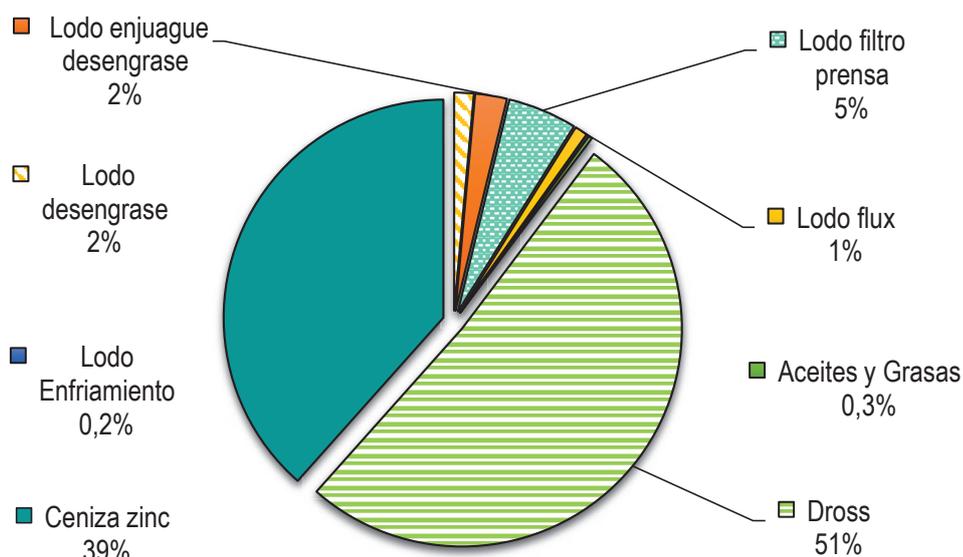
Tabla Continuación...

Identificación	Fase	Residuo sólido (kg /t _{ag})
M/D	Recubrimiento metálico	7,42
C	Recubrimiento metálico	5,56
Total		14,45

Nota. (*) Lodo generado por la regeneración del baño, (**) Lodo generado por el tratamiento del baño a través de su paso por un filtro prensa

ELABORACIÓN: Salazar K.

FIGURA 0.9 Generación residuos/ subproductos sólidos por fase (en %)



ELABORACIÓN: Salazar K.

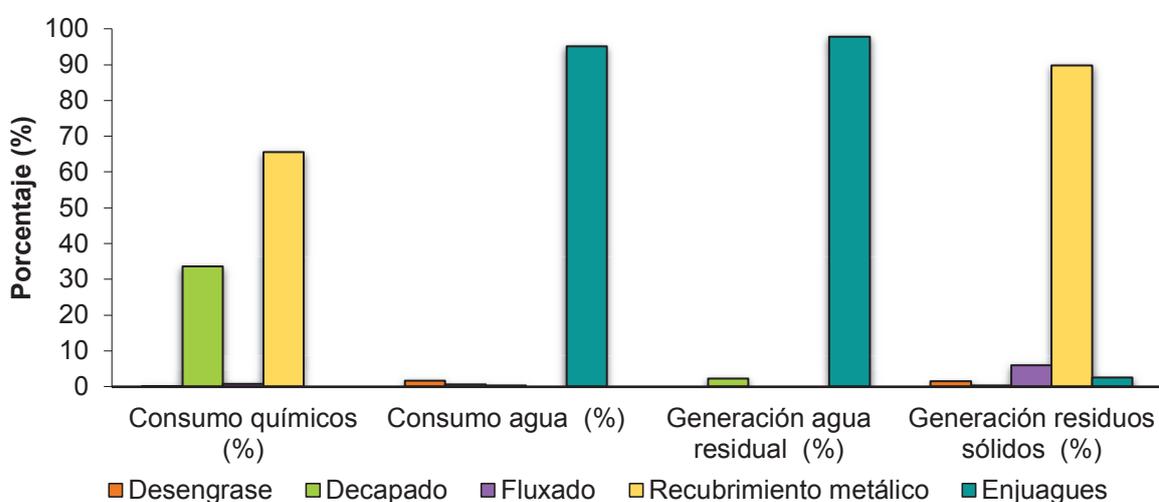
4.1.3. PUNTOS CRÍTICOS DEL PROCESO DE GALVANIZADO

La Figura 4.10 presenta la distribución porcentual (en peso) de consumos de agua fresca, productos químicos y generación de residuos líquidos, y sólidos dentro del proceso de la planta de galvanizado.

Las fases de enjuague y recubrimiento metálico fueron, las principales fuentes de generación de residuos líquidos (96%) y de residuos sólidos (90%),

respectivamente. Mientras que, las fases de mayor consumo de productos químicos fue de recubrimiento metálico (66%) y decapado (33%). Cerca del 95% del volumen de agua consumida en el proceso productivo, fue por actividades de lavado. Por lo tanto, alternativas de reúso son importantes respecto a posibilidades de minimización (Rivela et al., 2004).

FIGURA 0.10 Distribución del consumo de agua y productos químicos, y la generación de residuos entre fases de producción



ELABORACIÓN: Salazar K.

4.1.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS CORRIENTES LÍQUIDAS

4.1.4.1. Caudales de las fases de producción

La Tabla 4.5 presenta los caudales (L/s) de cada fase del proceso productivo. Adicionalmente, se señala el flujo de agua (L/h), el cual a diferencia del caudal considera las horas operativas de las fases de producción.

La fase de enjuague de desengrase presentó la tasa de flujo más elevada (1118,3 L/h) dentro del proceso. Mientras que el flujo de agua en la fase de fluxado para nivelar el baño (por evaporación) registró el valor más bajo (8,7 L/h).

TABLA 0.5 Flujos de agua de las corrientes líquidas del proceso

Proceso	Fase	Identificación		Caudal (L/s)	Flujo de agua (L/h)
		A	V		
1. DESENGRASE	Desengrase	A ₁	-	0,014	51,94
	Enjuague	AL ₁	VL ₁	0,31	1118,27
	Decapado 1	A _{2.1}	V _{2.1}	0,0063	22,71
2. DECAPADO	Decapado 2	A _{2.2}	V _{2.2}	0,0063	22,71
	Decapado 3	A _{2.3}	V _{2.3}	0,0063	22,71
	Enjuague 1	AL _{2.1}	VL _{2.1}	0,21	744,68
	Enjuague 2	AL _{2.2}	VL _{2.2}	0,20	705,42
3. FLUXADO	Fluxado	A ₃	-	0,0024	8,66
4. RECUBRIMIENTO METÁLICO	Enfriamiento	AL ₄	VL ₄	0,22	369,45
5. CALDERO	Caldero	A ₅	V ₅	0,013	32,46
6. PUNTO RECOLECCIÓN	Recolección residuo líquido	-	V _{6.1}	0,83	2840,94

ELABORACIÓN: Salazar K.

4.1.4.2. Análisis de los parámetros de las corrientes líquidas del proceso

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la caracterización físico-química de las diferentes corrientes líquidas que componen el proceso productivo.

La Tabla 4.6 presenta los valores medios de catorce parámetros críticos asociados a cada corriente. Los valores reportados para las distintas corrientes líquidas de acabado superficial con zinc, reflejan que uno de los grupos más importantes de contaminantes lo constituyeron los SFT, con valores que fluctuaron entre 43 mg/L (caldero) a 340440 mg/L (decapado). Además, las corrientes contienen cantidades importantes de ST en un rango de 54 mg/L (caldero) a 345302 mg/L (decapado). Los componentes orgánicos de las mismas, expresados en DQO, obtuvieron valores del orden de 2 mg/L (caldero) a 20950 mg/L (fluxado). No obstante, se alcanzaron bajos niveles de DQO en las descargas de las fases de enjuague (6 - 111 mg/L). Corrientes líquidas ricas en sustancias inorgánicas presentaron valores entre 11,4 mg/L (caldero) a 374550 mg/L (decapado) para la conductividad, 0 mg/L (caldero) a 1067045 mg/L (decapado) para los cloruros.

TABLA 0.6 Concentración de los componentes de las corrientes líquidas del proceso

Proceso	Fase	V	Q (L/s)	pH in situ	Temperatura (°C)	Conductividad (µs/cm)	DQO (mgO ₂ /L)	ST (mg/L)
1. DESENGRASE	Desengrase	-	0,13	11,87 (11,8 - 12)	55,35 (56,6 - 54,1)	49555 (47210 - 51900)	9080 (8360 - 9800)	36213 (34920 - 37506)
	Enjuague	VL1	0,31	8,66 (7,37 - 9,9)	20 (18,5 - 21,5)	980,5 (786 - 1175)	23,5 (21 - 26)	655 (584 - 726)
2. DECAPADO	Decapado 1	V2.1	0,006	0 (0 - 0)	17,40 (16,8 - 18)	374550 (154300 - 594800)	18625 (13850 - 23400)	345302 (148108 - 542496)
	Decapado 2	V2.2	0,006	0 (0 - 0)	17,40 (16,8 - 18)	374550 (154300 - 594800)	18625 (13850 - 23400)	345302 (148108 - 542496)
	Decapado 3	V2.3	0,006	0 (0 - 0)	17,40 (16,8 - 18)	374550 (154300 - 594800)	18625 (13850 - 23400)	345302 (148108 - 542496)
	Enjuague 1	VL2.1	0,21	2,73 (2,6 - 2,86)	16,60 (16,2 - 17)	5634,5 (4649 - 6620)	111 (81 - 141)	2085 (1740 - 2430)
	Enjuague 2	VL2.2	0,20	5,65 (5,5 - 5,8)	15,90 (15,9 - 15,9)	1645 (1504 - 1786)	64 (24 - 104)	1018 (834 - 1202)
	Fluxado	-	0,003	5,44 (5,5 - 5,41)	49,55 (43,9 - 55,2)	181450 (174000 - 188900)	20950 (16000 - 25900)	180745 (176682 - 184808)
4. RECUBRIMIENTO METÁLICO	Baño de Zinc	-	-	-	-	-	-	-
	Enfriamiento	VL4	0,22	7,89 (7,8 - 7,95)	61,20 (58,2 - 64,2)	885 (720 - 1050)	6 (4 - 8)	544 (504 - 584)
5. CALDERO	Caldero	V5	0,013	5,97 (5,94 - 6)	52,6 (52,5 - 52,7)	11,4 (10,7 - 12,1)	2 (0 - 4)	54 (54 - 54)
6. PUNTO RECOLECCIÓN	Recolección residuo	V6.1	0,87	4,73 (2,88 - 6,6)	20,15 (17,7 - 22,6)	1987 (1490 - 2484)	55 (37 - 73)	1203 (1038 - 1368)
	Tanque de homogenización	V6.2	-	3,99 (2,8 - 5,2)	18,7 (17,5 - 19,9)	7025 (6270 - 7780)	338 (226 - 450)	3535 (1336 - 5734)

Tabla Continuación...

Proceso	V	SFT (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	Zn (mg/L)	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	SAAM (mg/L)	A y G (mg/L)	(Cl ⁻) (mg/L)
1. DESENGRASE	-	34968 (33456 – 36480)	3,13 (2,6 - 3,65)	14,2 (10,4 – 18)	31 (13 – 49)	0,99 (1,05 - 0,93)	11,32 (6,04 - 16,59)	18620,2 -	109,19 (69,48 - 148,89)
	VL ₁	601 (546 – 656)	0,63 (0,15 - 1,1)	9,45 (7,4 - 11,5)	10,85 (10,2 - 11,5)	0,07 (0,05 - 0,07)	7,04 (5,14 - 8,93)	8,1 -	150,13 (126,56 - 173,71)
	V _{2.1}	340440 (141904 – 538976)	3 (2,8 - 3,2)	645 (410 – 880)	53300 (27000 - 79600)	1880 (1140 - 2620)	1,25 (1,20 - 1,31)	248,1 -	1067045 (148890 - 1985200)
	V _{2.2}	340440 (141904 – 538976)	3 (2,8 - 3,2)	645 (410 – 880)	53300 (27000 - 79600)	1880 (1140 - 2620)	1,25 (1,20 - 1,31)	248,1 -	1067045 (148890 – 1985200)
2. DECAPADO	V _{2.3}	340440 (141904 – 538976)	3 (2,8 - 3,2)	645 (410 – 880)	53300 (27000 - 79600)	1880 (1140 - 2620)	1,25 (1,20 - 1,31)	248,1 -	1067045 (1985200 – 148890)
	VL _{2.1}	2025 (1688 – 2362)	4,5 (2,9 - 6,1)	282,5 (220 – 345)	262,5 (215 – 310)	6,125 (4,25 – 8)	0,35 (0,27 - 0,43)	<5 -	1126,6 (952,90 - 1300,31)
	VL _{2.2}	995 (806 – 1184)	2,63 (1,9 - 3,35)	109,5 (81,5 - 137,5)	143 (131 – 155)	4,65 (0,3 – 9)	0,32 (0,28 - 0,35)	<5 -	461,56 (382,15 - 540,97)
3. FLUXADO	-	165958 (145846 – 186070)	6,4 (6,1 - 6,7)	58,5 (48 – 69)	149,5 (143 – 156)	59,5 (51 – 68)	0,18 (0,16 - 0,21)	19,4 -	85363,6 (62037,50 - 108689,70)
4. RECUBRIMIENTO METÁLICO	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VL ₄	514 (488 – 540)	1,48 (1,02 - 1,93)	2,24 (1,77 - 2,71)	1,075 (0,96 - 1,19)	0 (0 – 0)	0,36 (0,36 - 0,36)	5,6 -	140,2 (89,33 - 191,08)
5. CALDERO	V ₅	43 (42 – 44)	0,19 (0,15 - 0,22)	0,74 (0,28 - 1,2)	0,77 (0,54 - 0,99)	0,01 (0,01 - 0,01)	0,22 (0,09 - 0,35)	0 -	0 (0 – 0)
	V _{6.1}	1133 (934 – 1332)	12,25 (2,1 - 22,4)	185,25 (98 - 272,5)	171,5 (74 – 195)	2,86 (1,14 - 4,57)	4,34 (2,83 - 5,86)	<5 -	641,29 (402 - 880,58)
6. PUNTO RECOLECCIÓN	V _{6.2}	3413 (1238 – 5588)	28,9 (21,8 – 36)	398,75 (375 - 422,5)	491,25 (312,5 – 670)	4,54 (2,4 - 6,67)	3,95 (1,81 - 6,10)	85,4 -	1210,97 (1116,68 - 1305,27)

Nota. () Rango de variación, (Q) Caudal

ELABORACIÓN: Salazar K.

Las concentraciones de metales en los residuos líquidos oscilaron, para el Fe entre 0,77 mg/L (caldero) a 53300 mg/L (decapado), para el Zn entre 0,74 mg/L (caldero) a 645 mg/L (decapado), y para el Cu de 0 mg/L (enfriamiento) a 1880 mg/L (decapado). El pH y la temperatura presentaron valores extremos de 0 (decapado) a 11,9 (desengrase), y de 15,9 ° C (enjuague 2) a 61,2 ° C (enfriamiento), respectivamente. En lo referente al amoníaco se encontró que la operación de homogenización de caudal (tanque de mezcla) tuvo el límite superior con un valor cercano a 28,9 mg/L; mientras que, el límite inferior tuvo un valor de 0,19 mg/L (caldero). Las corrientes líquidas presentaron cantidades variables de tensoactivos y de aceites y grasas, con mayor presencia en la fase de desengrase (11,3 mg SAAM/L y 18620,2 mg A y G/L) y un valor prácticamente despreciable en la descarga del caldero (0,22 mg SAAM/L y 0 mg A y G/L).

La descarga líquida del enjuague de desengrase (V_{L1}) constituyó un significativo aporte en tensoactivos (5,1 - 8,9 mg/L) y aceites y grasas (8,1 mg/L) al flujo de descargas líquidas global. Lo cual, denota el arrastre de estas sustancias desde la fase previa (agente desengrasante). Este residuo líquido tipo alcalino (pH igual a 8,7) alcanzó valores medios de ST (655 mg/L), SFT (601 mg/L), DQO (23,5 mg/L), Fe (10,6 mg/L), y conductividad (980,5 μ s/cm), similares a lo reportado por Moya (2013) pH (8,8-9), ST (526-510 mg/L). Aunque difieren ampliamente respecto a los valores de SFT (330 mg/L), DQO (4,8 mg/L), Fe (1,6 mg/L), y conductividad (660 μ s/cm) señalados en el mismo estudio.

En los baños de decapado ($V_{2.1}$, $V_{2.2}$ y $V_{2.3}$) se encontró que el contenido de Zn llegó a alcanzar concentraciones entre 410 a 810 mg/L y de 79,6 g/L en el caso del Fe. La literatura indica que los baños agotados altamente contaminados concentran cantidades que fluctúan entre 5 a 200 g/L de Zn y entre 60 a 150 g/L de Fe (Lum et al., 2014; Stocks et al., 2005). No obstante, la composición del ácido decapante determinadas en el presente estudio varían de los valores referenciados, debido a que depende de las técnicas de decapado y operativas propias de la planta (Stocks et al., 2005). Los valores promedio de pH (0), temperatura (17,4°C), ST (345302 mg/L), SFT (340440 mg/L) y DQO (18625 mg/L) se encontraron directamente

relacionados con los valores señalados en bibliografía. Estos parámetros presentan valores típicos de pH (0), temperatura (18°C), ST (380430 mg/L), SFT (377920 mg/L) y DQO (20000 mg/L) semejantes (Aldana y Pacheco, 2014; Fajardo, 2014).

Las corrientes de residuo líquido procedentes del enjuague de decapado (VL_{2.1}, VL_{2.2}) suponen una importante fuente contaminante, en términos de metales (Zn 282,5 mg/L y 109,5 mg/L; Fe 262,5 mg/L y 143 mg/L; y Cu 6,1 mg/L y 4,7 mg/L respectivamente) y de sólidos (ST 2085 mg/L, 1018 mg/L respectivamente). La principal ruta de contaminación de los mismos se debió al arrastre de la solución de decapado en la fase previa (ASIMET y CPL, 2014). Al contrastar el enjuague 1 (VL_{2.1}) respecto a los valores promedio de pH (2,7), temperatura (16,6°C), conductividad (5634,5 µs/cm), Cu (6,1 mg/L) y Zn (282,5 mg/L), SFT (2025 mg/L) con los presentados por Morales y Acosta (2010), respecto a pH (1,4), temperatura de (18,2°C), conductividad (264 µs/cm), Cu (1,5 mg/L), y Zn (3800 mg/L); y por Moya (2013), para SFT (280-320 mg/L), conductividad (580 µs/cm), se observa que, a excepción de la temperatura y pH, se diferencian ampliamente.

Las descargas derivadas de las fases de caldero (V₅) y enfriamiento (VL₄) exhibieron un carácter contaminante inferior respecto a las otras corrientes de lavado. Estos residuos líquidos presentaron fracciones ligeras de metales, Zn entre 0,74 a 2,2 mg/L y Fe entre 0,77 a 1 mg/L; y de sólidos totales (54 - 544 mg/L) y disueltos (43 - 514 mg/L). No obstante, la elevada temperatura de estos residuos estuvo entre un rango entre 52,6 a 61,2 °C. Al comparar los valores encontrados en la fase de enfriamiento de la planta, respecto a pH (7,90), conductividad (885 µs/cm), DQO (6 mg/L), ST (544 mg/L) y Fe (1,1 mg/L) con los bibliográficos de pH (7,3), conductividad (720 µs/cm), DQO (0 mg/L), ST (480 mg/L) y Fe (0,49 mg/L) se visualiza que son éstos son ligeramente superiores (Moya, 2013).

La descarga global (V_{6.1}), que incluye la mezcla de los residuos líquidos de las fases de enjuague (VL₁, VL_{2.1}, VL_{2.2}, VL₄) y caldero (V₅), se caracterizó por su bajo contenido orgánico (DQO: 37 - 73 mg/L), alto contenido de ST (1038 - 1368 mg/L) y elevada conductividad (1490-2484 µs/cm). Este comportamiento está asociado con la presencia de cloruros (402 - 635,3 mg/L). Entre los metales pesados

presentes en el residuo se detectó, Zn (98 - 272,5 mg/L), Cu (1,1 - 4,6 mg/L) y Fe (74 - 195 mg/L), los cuales son superiores a los reportados bibliográficamente Zn (9-22 mg/L), Fe (0,35 mg/L) a excepción del Cu (4,7 mg/L) (Pellón et al., 2003). Este fenómeno tiene relación con el tipo de proceso dentro de la planta de galvanizado (Cascaret et al., 2009), que en el caso de la planta estudiada en esta tesis es discontinuo. La variabilidad en los valores de pH (2,9-6,6), dependió de las prácticas operativas. El primer valor de pH (2,9) correspondió al proceso productivo sin la fase de enfriamiento; mientras que, el segundo valor (6,6) tuvo lugar cuando todos los enjuagues de la línea estuvieron abiertos. Sin embargo, dicha variación corresponde con lo señalado por la bibliografía para el pH (2,2-6,5) (García, 2014). En otro aspecto, existen parámetros como ST (1203 mg/L), DQO (55 mg/L), y Cl⁻ (641,3 mg/L) que se ajustaron a los datos reportados para ST (1072 mg/L); DQO (56-139 mg/L) y Cl⁻ (640-1100 mg/L) (Espinoza et al., 2012).

- *Cargas contaminantes de las corrientes líquidas*

La Tabla 4.7 presenta las cargas contaminantes de las corrientes líquidas de las fases del proceso, expresadas como kg/h.

En términos de carga orgánica (DQO) y carga en sólidos totales como disueltos (ST, SFT) las corrientes líquidas presentaron cantidades que van de 0,1 a 4118,7 kg DQO/h, de 2,4 a 16426,2 kg ST/h y de 1,9 a 15861,5 kg SFT/h con un volumen total de descarga equivalente a $71,9 \pm 1,6$ m³/día. Respecto al contenido de carga en estos parámetros, se han agrupado las corrientes de la siguiente forma: Desengrase > Decapado > Fluxado > Enjuague 1 > Enjuague 2 > Enjuague desengrase > Enfriamiento > Caldero. De forma que las corrientes de desengrase, decapado y fluxado pudieron determinarse como altamente cargadas en materia orgánica y sólidos filtrables. Mientras que, las corrientes de enjuague de desengrase, enfriamiento y caldero tuvieron cargas menores, y los enjuagues 1 y 2 del decapado se vincularon con una carga intermedia. La carga en nutrientes tuvo valores cercanos a 0,01 y 3,4 kg N-NH₄⁺/h, con la siguiente incidencia en las corrientes Enjuague 1 > Enjuague 2 > Desengrase > Enfriamiento > Enjuague desengrase > Decapado > Fluxado > Caldero.

TABLA 0.7 Cargas contaminantes de las fases del proceso

Proceso	Fase	V	DQO (kg/h)	ST (kg/h)	SFT (kg/h)	N-NH ₄ ⁺ (kg/h)	Zn (kg/h)	Fe (kg/h)	Cu (kg/h)	SAAM (kg/h)	A y G (kg/h)	Cl ⁻ (kg/h)
1. DESENGRASE	Desengrase	-	4118,7	16426,2	15861,5	1,4	6,4	14,1	0,4	5,1	8446,1	49,5
	Enjuague	VL ₁	26,3	732,5	672,1	0,7	10,6	12,1	0,1	7,9	9,1	167,9
2. DECAPADO	Decapado 1	V _{2.1}	423,0	7841,8	7731,4	0,1	14,6	1210,4	42,7	0,03	5,6	24232,5
	Decapado 2	V _{2.2}	423,0	7841,8	7731,4	0,1	14,6	1210,4	42,7	0,03	5,6	24232,5
	Decapado 3	V _{2.3}	423,0	7841,8	7731,4	0,1	14,6	1210,4	42,7	0,03	5,6	24232,5
	Enjuague 1	VL _{2.1}	82,7	1552,7	1508,0	3,4	210,4	195,5	4,6	0,3	3,1	839,0
	Enjuague 2	VL _{2.2}	45,1	718,1	701,9	1,9	77,2	100,9	3,3	0,2	3,5	325,6
	Fluxado	-	181,0	1561,6	1433,9	0,1	0,5	1,3	0,5	0,002	0,2	737,5
4. RECUBRIMIENTO METÁLICO	Baño de Zinc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Enfriamiento	VL ₄	4,7	422,1	398,8	1,1	1,7	0,8	0	0,3	4,3	108,8
5. CALDERO	Caldero	V ₅	0,1	2,4	1,9	0,01	0,03	0,03	0,0005	0,01	0	0
6. PUNTO RECOLECCIÓN	Recolección residuos líquidos	V _{6.1}	164,9	3607,7	3397,8	36,7	364,4	309,6	8,6	9,4	18,0	1555,4
	Tanque de homogenización	V _{6.2}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ELABORACIÓN: Salazar K.

La carga inorgánica de la planta industrial evaluada, fue del orden de 0,03 a 1210,4 kg/h para Fe; de 0 a 42,7 kg/h para Cu; y de 0,03 a 210,4 kg /h para Zn. Las corrientes con base en su contenido metálico presentaron la siguiente clasificación Decapado > Enjuague 1 > Enjuague 2 > Desengrase > Enjuague desengrase > Fluxado > Enfriamiento > Caldero. De acuerdo a lo cual, los residuos líquidos procedentes de las fases de enfriamiento y caldero vuelven a presentar niveles bajos en carga contaminante de metales. Por otro lado, dentro de este rubro, la carga en cloruros obtuvo valores entre 0 a 24232,5 kg Cl⁻ /h; y un ranking algo diferente que en los metales (Decapado > Enjuague 1> Fluxado > Enjuague 2 > Enjuague desengrase >Enfriamiento > Desengrase >Caldero). Este fenómeno se debe a que el contenido de metales en la fase de fluxado presentó una carga menor en comparación con las otras corrientes. No obstante, el contenido en cloruros fue elevado frente a otras corrientes, correspondiente a la composición del baño (cloruro de amonio y zinc).

La carga en tensoactivos presentó valores entre 0,01 a 7,9 kg/h; con la siguiente clasificación en las corrientes: Enjuague desengrase > Desengrase > Enjuague 1 > Enfriamiento > Enjuague 2 > Decapado > Fluxado > Caldero. Mientras que, la carga en aceites y grasas tuvo un valor oscilante entre 0 a 8446,1 kg/h. Con el siguiente orden de flujos: Desengrase > Enjuague desengrase > Decapado > Enfriamiento > Enjuague 2 > Enjuague 1 > Fluxado > Caldero. El arrastre que existe de este residuo se observa con valores significativos hasta la fase de decapado (5,3 kg/L).

4.1.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y SEMISÓLIDOS

4.1.5.1. Análisis de los parámetros de caracterización de los residuos semisólidos

La composición química de los lodos galvánicos, en términos porcentuales (en peso) se presenta en la Tabla 4.8.

Los lodos evaluados se caracterizaron por su contenido elevado de material inorgánico (SV < 8,4%) y humedad (62,6 - 96,4%). El bajo contenido (en peso) de material orgánico determinado en los mismos, se aproximó a lo presentado en estudios previos (SV < 10%) (Klishchenko et al., 2010). De igual forma, el contenido

de humedad estuvo dentro de los rangos señalados en la bibliografía (72 - 85%) (Avila y Osorio, 2016; Levitskii y Poznyak, 2015).

En términos de óxidos metálicos, estos residuos semisólidos se compusieron principalmente de hierro, silicio y zinc. Los valores oscilaron entre 21,3 a 54,6% p/p para el Fe_2O_3 , cuyo límite inferior y superior tuvo lugar en las fases de enfriamiento (L_4) y enjuague del desengrase (L_2), respectivamente. El SiO_2 tuvo un rango de variación entre 0,73 a 22,8%, en las fases de fluxado (L_3) y enjuague de desengrase (L_2). Finalmente, el ZnO presentó valores fluctuantes entre 2,9 y 29% correspondientes a las fases de fluxado (L_4) y de enfriamiento (L_5). Además, en los lodos se reportó presencia de cloruros (0,09 - 16,7%), con mayor predominancia en la fase de fluxado (9,5 - 16,7%). Los valores encontrados en este estudio fueron congruentes con los valores comúnmente referenciados, respecto a Fe_2O_3 (12,7 - 58,5%), SiO_2 (0,47 - 57,3 %) y ZnO (1,7 - 9,4%) (Levitskii et al., 2013). Por otro lado, en cuanto al contenido de pH (4,7 - 11,7), los lodos obtuvieron valores próximos a los registrados en las corrientes líquidas, de las fases de su procedencia (Rojas, 2002). De esta forma, la corriente líquida y el lodo generado en la fase de desengrase reportaron un pH cercano a 11,9 (A_1) y 11,7 (L_1), respectivamente. No obstante, el rango de pH de los lodos de este estudio (4,7 - 11,7) fue ligeramente superior a los valores citados en trabajos previos (3,4 - 7,9) (Levitskii y Poznyak, 2015).

TABLA 0.8 Caracterización físico-química de los lodos procedentes del proceso

ID.	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ST (%)	Humedad (%)	SV (%)	Fe_2O_3 (%) *	SiO_2 (%) *	ZnO (%) *	Cl (%) *
L1	11,70	7030	9,17	90,83	1,24	50,69	17,94	3,51	1,35
L2	8,00	347	3,56	96,44	0,68	54,60	22,76	4,33	0,25
L3	5,20	13470	19,80	80,17	6,44	28,52	0,73	7,81	16,7
L4	5,60	11120	63,90	36,11	8,42	53,81	1,12	2,98	9,50
L5	7,30	162	37,30	62,63	2,62	21,34	18,45	29,0	0,09
L6	4,70	64500	10,50	89,53	2,69	47,18	13,44	5,86	6,77

Nota. (*) Valores proporcionados por la planta, % en peso

ELABORACIÓN: Salazar K.

4.1.5.2. Análisis de los parámetros de caracterización de los residuos sólidos

La Tabla 4.9 resume las características metálicas de los residuos sólidos obtenidos en la fase de recubrimiento. Las matas (95-97% p/p) y la ceniza (73-81% p/p) presentaron un elevado contenido de zinc metálico. Además, se reportó la presencia de trazas de hierro (1,5-1,7%) en las matas de zinc, esto debido al desprendimiento de este elemento desde el material base. En bibliografía, se han reportado valores de zinc en matas entre 95 y 98% (CE, 2006) y entre 71 a 75% en las cenizas. Mientras que, el hierro en las matas posee valores entre 0,3 a 8,3% (Delvasto et al., 2012). Por lo tanto, al comparar estos valores con los presentados en la planta, se puede evidenciar que la composición de estos residuos siderúrgicos se encuentra dentro de rangos referenciados habitualmente.

TABLA 0.9 Caracterización de los residuos siderúrgicos

Identificación	Zinc (%)*		Hierro (%)*	
	RANGO		RANGO	
Matas	95,21	97,11	1,45	1,73
Ceniza de zinc	72,90	81,02	-	-

Nota. (*) Valores proporcionados por la planta, % en peso

FUENTE: Novacero S.A.

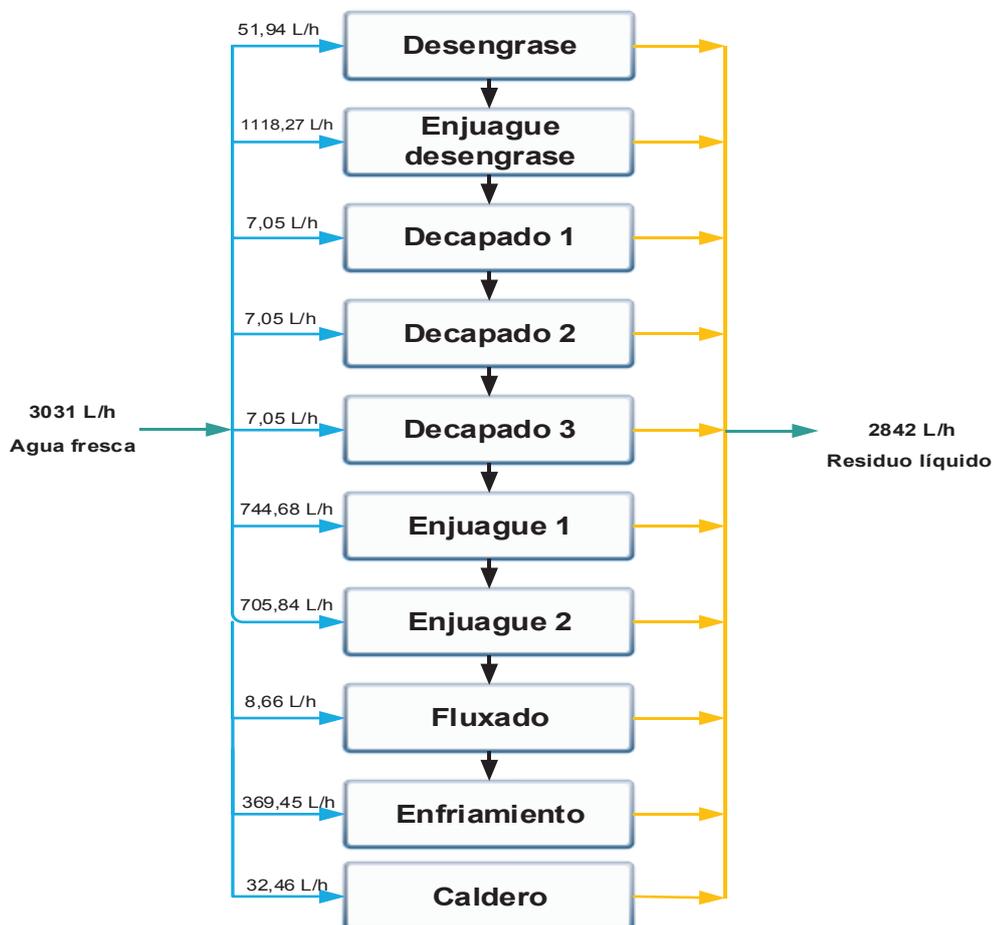
4.2. MODELOS MATEMÁTICOS DE SEGREGACIÓN, REÚSO Y RECICLAJE DE AGUA

4.2.1. METODOLOGÍA WATER PINCH

En la planta de galvanizado se identificaron 10 puntos de uso de agua fresca y/o regenerada distribuidos en diferentes fases involucradas en el proceso productivo. Las fases demandantes de agua incluyeron: enjuagues (AL₁, AL_{2.1}, AL_{2.2}, AL₄), decapado (A_{2.1}, A_{2.2}, A_{2.3}), caldero (A₅), desengrase (A₁) y fluxado (A₃).

La Figura 4.11 expone las entradas de agua fresca (fuentes de abastecimiento) y salidas de residuos líquidos de cada fase del proceso.

FIGURA 0.11 Fases que consumen agua en el sistema actual de la red de corrientes líquidas de la planta de galvanizado



ELABORACIÓN: Salazar K.

Como ha sido mencionado anteriormente, los enjuagues utilizaron agua fresca para la limpieza de las piezas metálicas. En el decapado, el uso de agua se debió a la elaboración de un nuevo baño. En el caldero el agua, en estado de vapor, se usó para transferir calor hacia dos baños que operan a elevada temperatura (desengrase y fluxado). Finalmente, las fases restantes, fluxado y desengrase, requirieron de agua fresca para el nivelado de los baños por efecto de evaporación. Dentro de estos puntos de uso de agua fresca y/o regenerada, las fases de enjuague (consideradas en el análisis *Pinch*) fueron las más representativas en el proceso, puesto que utilizaron una tasa de agua superior a $340 \text{ m}^3/\text{h}$ y representaron el 95% de la demanda total de agua fresca.

4.2.1.1. Curva Compuesta de Concentraciones

La Tabla 4.10 presenta los datos limitantes de las cuatro fases productivas evaluadas, en términos de SFT, Zn, y DQO, respectivamente. Esta tabla se incluye las tasas de flujo de agua fresca (F_i) en m^3/h , las concentraciones máximas de contaminante a la entrada ($C_{i,ent}^{máx}$) y salida ($C_{i,sal}^{máx}$) en mg/L y la masa transferida para cada operación (Δm_i) en g/h.

TABLA 0.10 Valores límites del proceso de galvanizado

Fase	Id.	Contaminante	C_{ent} (mg/L)	C_{sal} (mg/L)	Δm_i (g/h)	F_i (m^3/h)	$f_{i\ min}$ (m^3/h)
Enjuague desengrase	VL ₁	SFT	454	601	164,39	1,12	0,27
		Zn	0,25	9,5	10,29	1,12	1,09
		DQO	5	23,5	20,69	1,12	0,88
Enjuague 1	VL ₂	SFT	454	2025	1169,89	0,74	0,58
		Zn	0,25	282,5	210,19	0,74	0,74
		DQO	5	111,0	78,94	0,74	0,71
Enjuague 2	VL ₃	SFT	454	995	381,63	0,71	0,38
		Zn	0,25	109,5	77,07	0,71	0,70
		DQO	5	64,0	41,62	0,71	0,65
Enfriamiento	VL ₄	SFT	454	514	46,55	0,78	0,09
		Zn	0,25	2,2	1,54	0,78	0,69
		DQO	5	6,0	0,78	0,78	0,13

Nota. (C) concentración máxima

ELABORACIÓN: Salazar K.

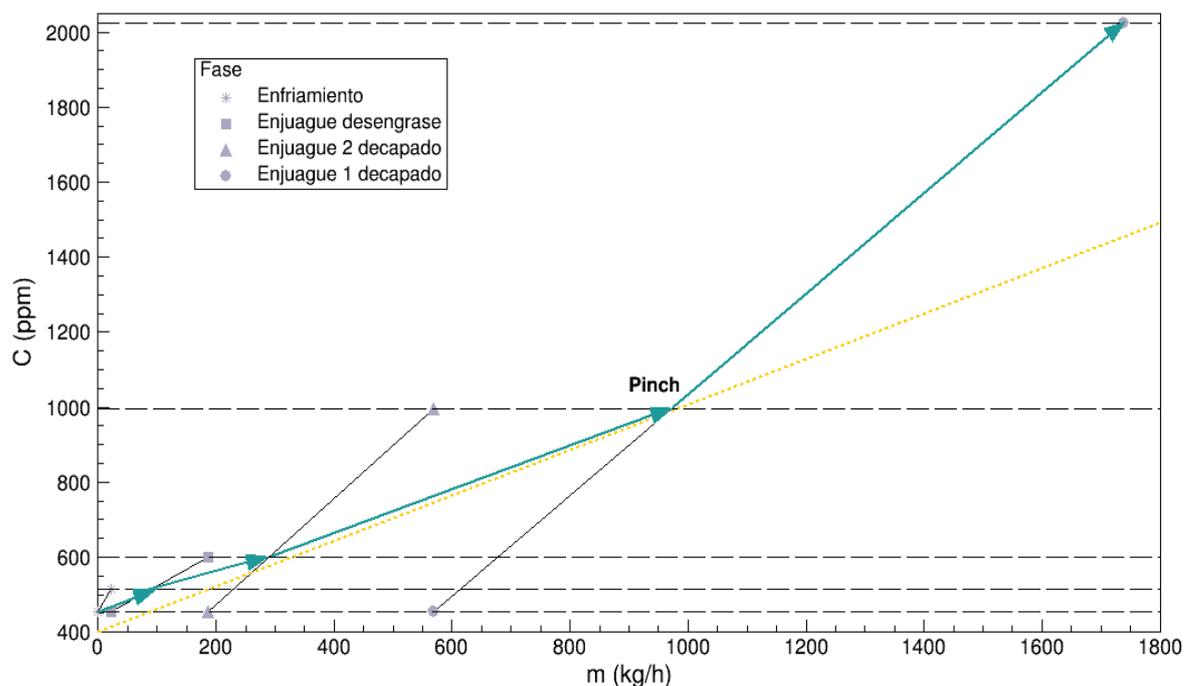
Las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 muestran la Curva Compuesta de Concentraciones (CCC) y la Línea de Suministro de Agua Fresca (LSA) de las fases evaluadas según los parámetros limitantes definidos (SFT, Zn, y DQO).

- *Curva Compuesta de Concentraciones para SFT*

De acuerdo con la Figura 4.12, el caudal mínimo requerido por el proceso de galvanizado fue igual a 1808 L/h (1,8 m^3/h) bajo el enfoque de los SFT como contaminante único. En la gráfica, la C_{pinch} fue igual 995 mg/L y la Δm_{pinch} fue de

978 g/h. Los resultados muestran que la cantidad de agua dulce utilizada en las fases de enjuague puede disminuirse desde 2,9 m³/h a 1,8 m³/h, lo que representó alrededor de un 38,4%.

FIGURA 0.12 Curva Compuesta de Concentraciones para SFT



Nota. (Línea celeste) Curva Compuesta de Concentraciones; (Línea amarilla) Línea Suministro de Agua Fresca

ELABORACIÓN: Salazar K.

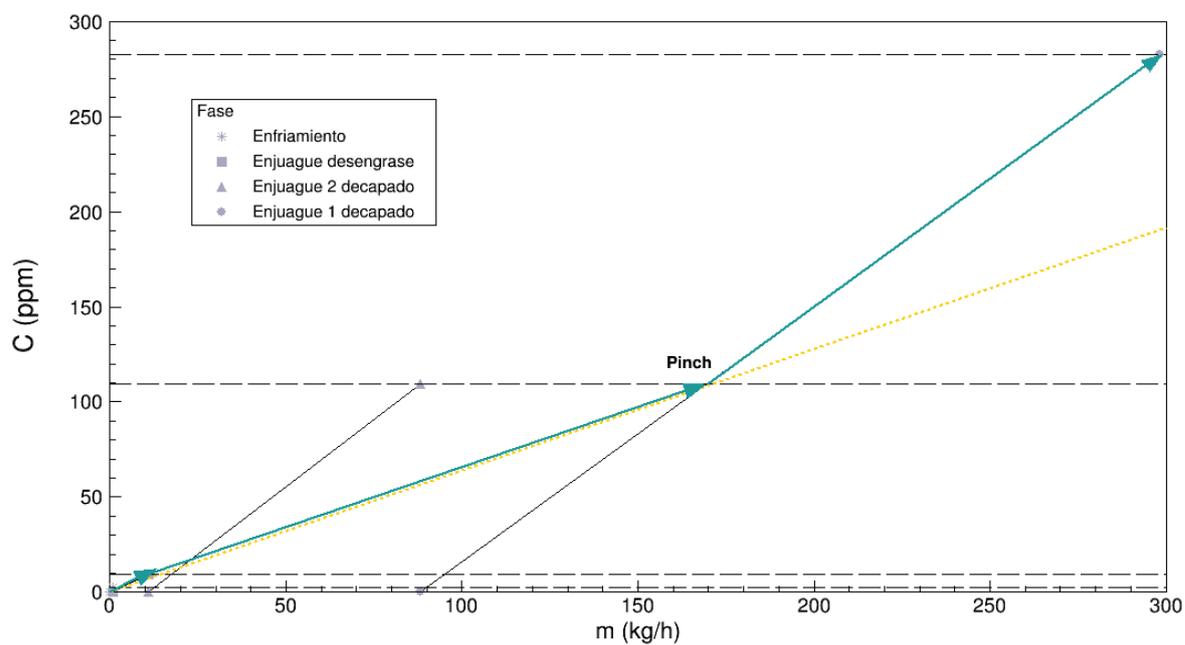
- *Curva Compuesta de Concentraciones del Zn*

Tomando como referencia la Figura 4.13, el caudal mínimo requerido por el proceso, considerando el Zn como contaminante único, es igual a 1551 L/h ($f_{\min} = (169,5 \text{ g/h} \times 10^3) / (109,5 - 0,25 \text{ mg/L})$). De forma que la cantidad de agua fresca, se reduce en un 47,2%, desde 2,9 m³/h a 1,5 m³/h.

- *Curva Compuesta de Concentraciones de la DQO*

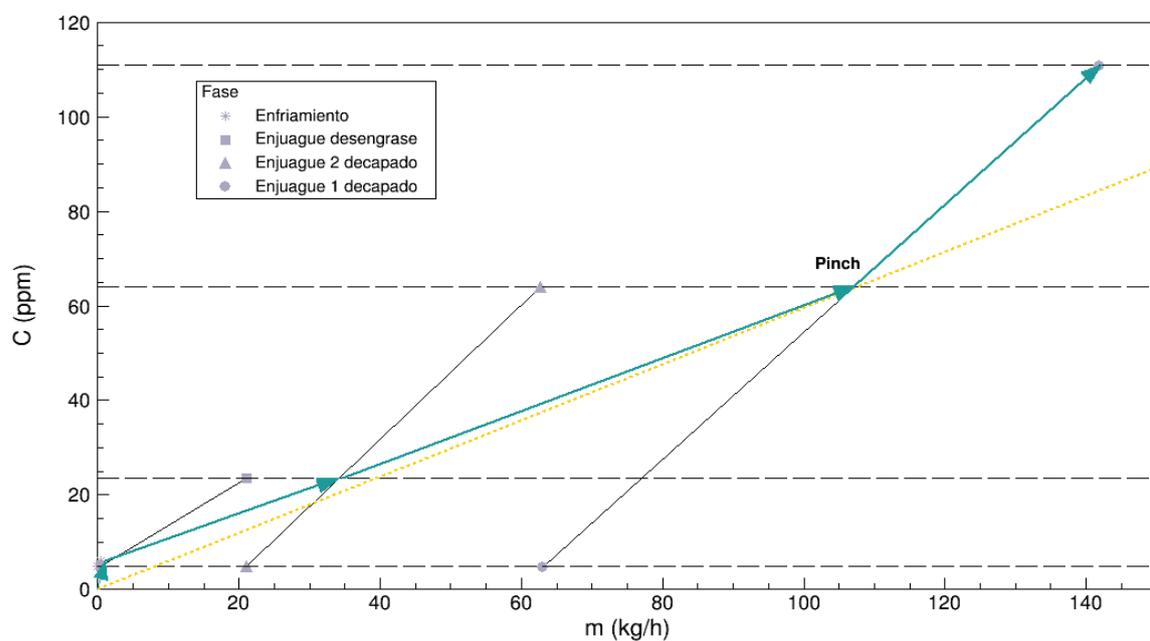
El caudal mínimo de agua fresca del proceso de galvanizado respecto a la DQO (Figura 4.14) presentó un valor cercano a 1807 L/h, con una disminución de 38,5% en el consumo de agua, lo que significó disminuir de 2,94 m³/h a 1,8 m³/h.

FIGURA 0.13 Curva Compuesta de Concentraciones del Zn



Nota. (Línea celeste) CCC; (Línea amarilla) Línea Suministro de Agua Fresca
ELABORACIÓN: Salazar K.

FIGURA 0.14 Curva Compuesta de Concentraciones de la DQO



Nota. (Línea celeste) Curva Concentración Compuesta; (Línea amarilla) Línea Suministro de Agua
ELABORACIÓN: Salazar K.

El flujo total requerido de agua dulce para el proceso productivo en términos de SFT, Zn y DQO fue de 1808 L/h, 1551 L/h y 1807 L/h, respectivamente. De igual forma, la cantidad de agua fresca disminuyó 1130 L/h (38,4%), 1386 L/h (47,2%) y 1131 L/h (38,5%).

La minimización del agua dentro de las fases, para SFT fue menor que los otros parámetros evaluados. Por lo tanto, este correspondió al contaminante limitante seleccionado para el diseño de la red de residuos líquidos.

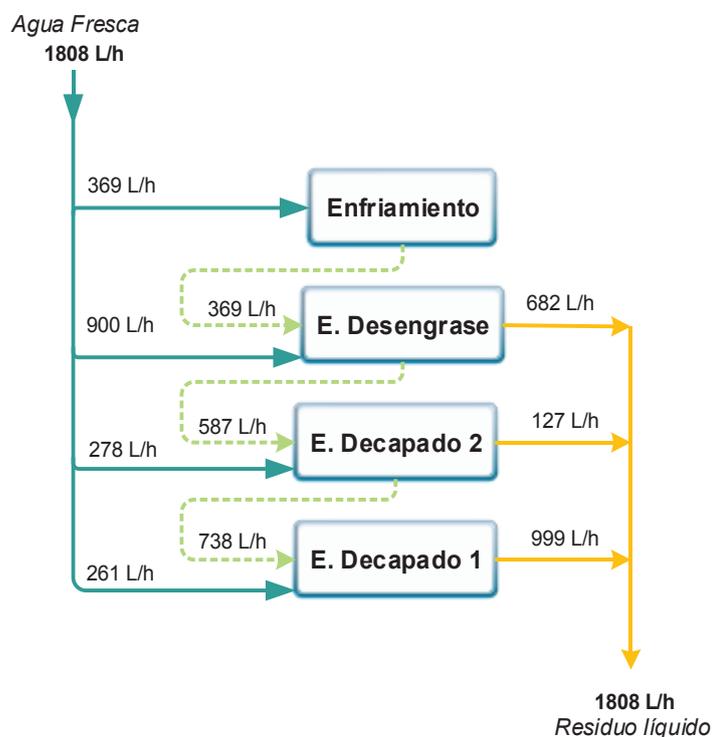
4.2.1.2. Configuración de la red de residuos líquidos para un contaminante único

La Figura 4.15 presenta una de las posibles configuraciones para los residuos líquidos de las fases de enjuague objeto de estudio, considerando a los SFT como contaminante limitante.

En este caso, el consumo total de agua fresca disminuyó un 38% (2937 a 1808 L/h). En este diseño, la nueva conexión de la red logró el uso mínimo de agua identificado (1808 L/h), mediante la mezcla de agua fresca y/o regenerada junto con el residuo líquido de menor carga, que la carga de la fase a la que ingresa. Lo cual, permitió que estas fuentes (agua fresca, regenerada y residuo líquido reusado) alcancen la concentración máxima de salida en cada operación y transfieran la carga másica prevista (especificadas en Tabla 4.10).

El residuo líquido de la fase de enfriamiento se reusó (100%, 369 L/h) en la fase de desengrase, que posteriormente se dirigió como entrada en el enjuague 2 del decapado (46,26%, 587 L/h). Finalmente, de este último se aprovechó el residuo líquido en el enjuague1 del decapado (83,26%, 738 L/h).

FIGURA 0.15 Configuración de la red de residuos líquidos considerando a los SFT como un contaminante único



Nota. (Línea celeste) Indica el ingreso de agua fresca en la fase; (Línea verde) Indica el reuso del residuo líquido; (Línea amarilla) Indica la descarga de residuos líquidos

ELABORACIÓN: Salazar K.

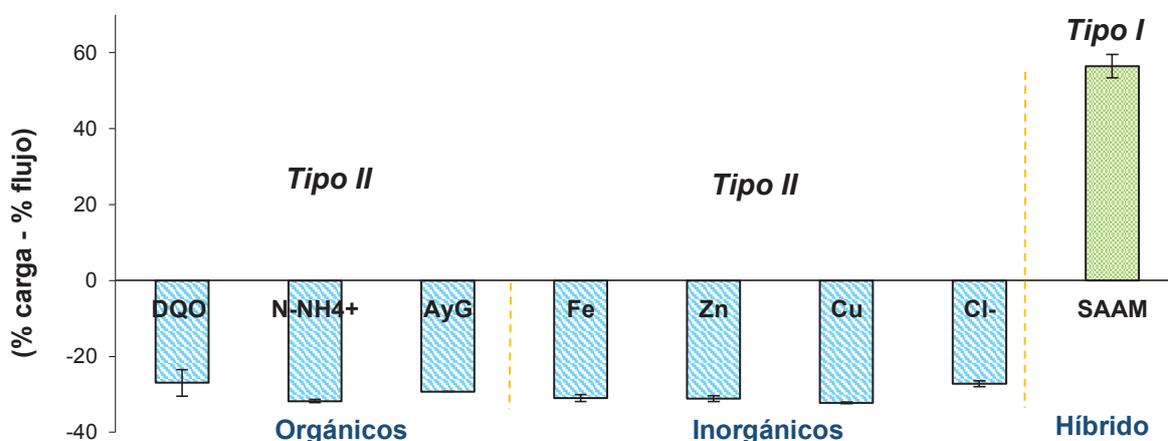
4.2.2. ÍNDICE DE SEGREGACIÓN (Sindex)

Las Figuras 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20, describen el tipo de corriente al que pertenecen las diferentes corrientes residuales líquidas, mediante su evaluación con el *Sindex* respecto a su carga orgánica (DQO, N-NH₄⁺, A y G), inorgánica (Fe, Zn, Cu, Cl⁻) e híbrida (SAAM) bajo los escenarios descritos en la metodología.

4.2.2.1. Análisis de las corrientes según el Sindex

La Figura 4.16 presenta los resultados del *Sindex* para el residuo líquido procedente de la fase de enjuague de desengrase (VL₁). De acuerdo con los parámetros orgánicos e inorgánicos ($S_{index} < 0$) este residuo pertenece a una corriente tipo II (baja carga) para los dos escenarios estudiados. Sin embargo, para el parámetro híbrido (tensoactivos) puede ser categorizada como tipo I ($S_{index} > 0$), correspondiente con una corriente de alta carga.

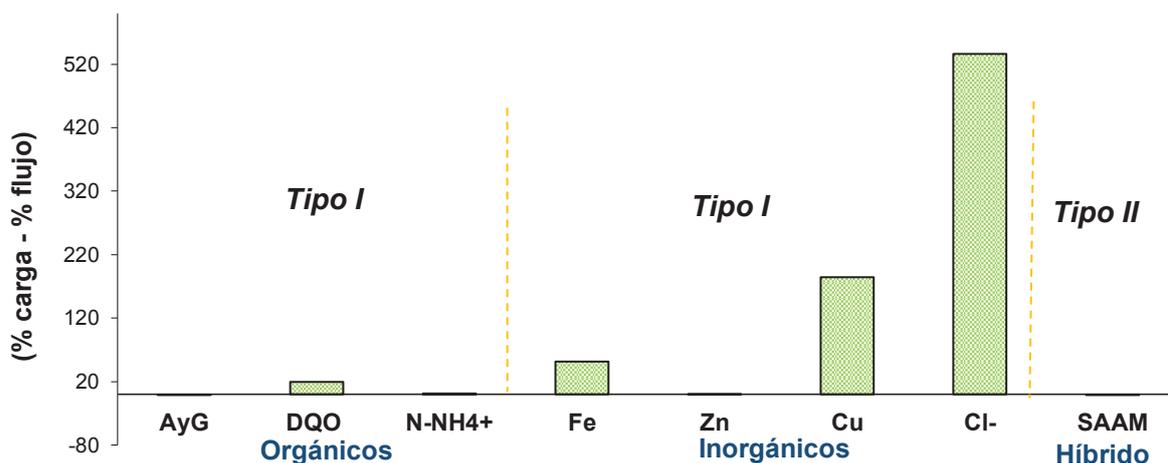
FIGURA 0.16 Segregación de corrientes utilizando el *Sindex* para la fase de enjuague del desengrase



ELABORACIÓN: Salazar K.

La Figura 4.17 indica que los distintos baños de decapado agotado (V_{2.1}, V_{2.2}, V_{2.3}) conforme a su carga orgánica e inorgánica, corresponden con una corriente tipo I ($S_{index} > 0$), es decir, de alta carga. No obstante, debido a su baja carga en tensoactivos (SAAM) estas corrientes pueden ser definidas como tipo II ($S_{index} < 0$).

FIGURA 0.17 Segregación de corrientes utilizando el *Sindex* para la fase de decapado agotado

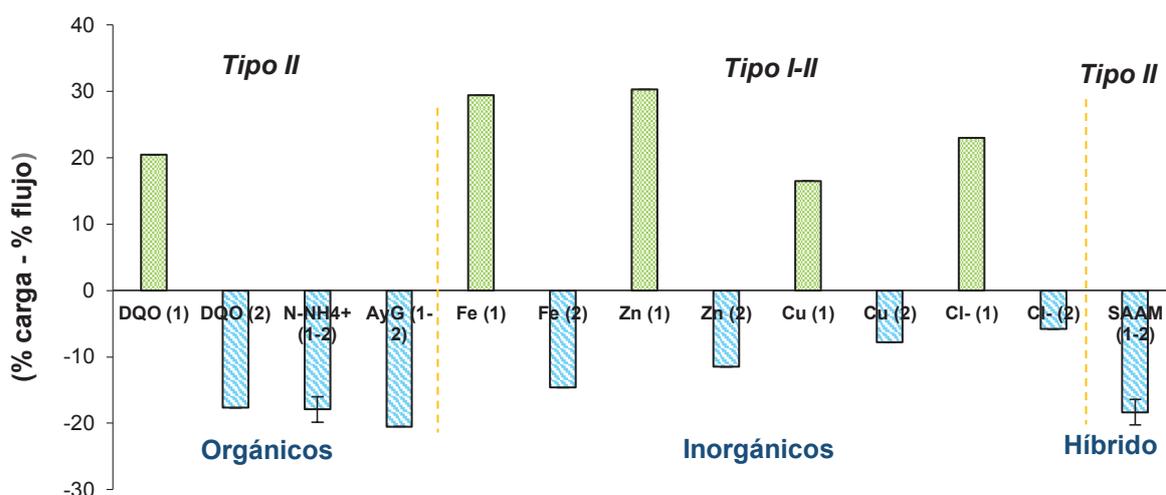


ELABORACIÓN: Salazar K.

Las Figuras 4.18 y 4.19 señalan que los residuos líquidos de las fases de enjuague 1 (VL_{2.1}) y enjuague 2 (VL_{2.2}) posteriores al decapado pertenecen a una corriente tipo II ($S_{index} < 0$), debido a su baja carga orgánica e híbrida. No obstante, el índice de segregación presentó variabilidad respecto a su valor en el caso del contenido

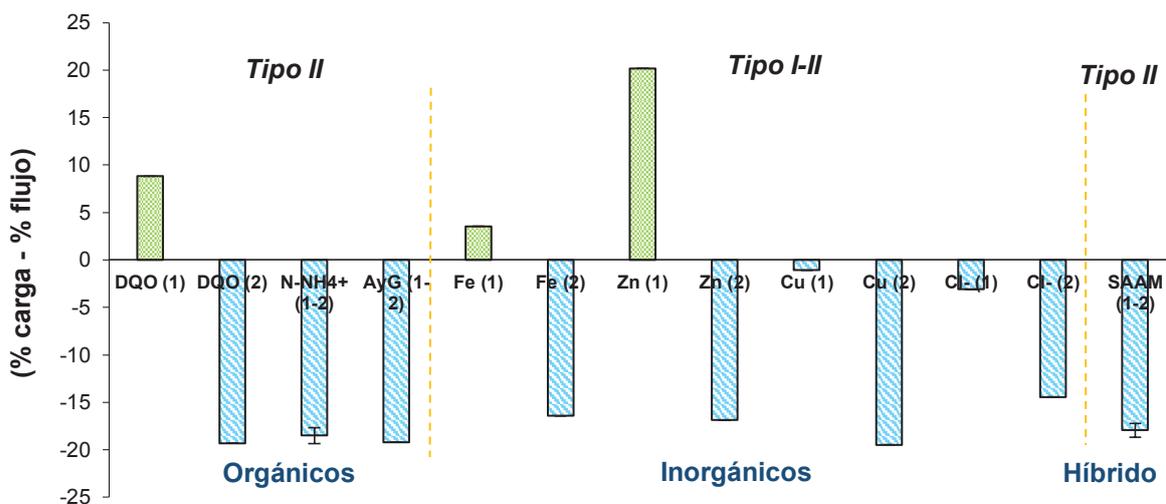
inorgánico en los dos escenarios planteados. Esto induce al hecho de que las corrientes líquidas podrían ser tratadas tanto como una corriente tipo I (escenario 1) como tipo II (escenario 2). Por lo tanto, en los siguientes apartados se enfatiza los criterios definidos para determinar el tipo de corriente al que pertenecen.

FIGURA 0.18 Segregación de corrientes utilizando el *Sindex* para la fase de enjuague 1



Nota. (1) Valores del escenario 1, (2) Valores del escenario 2, (1-2) Valor promedio dos escenarios
ELABORACIÓN: Salazar K.

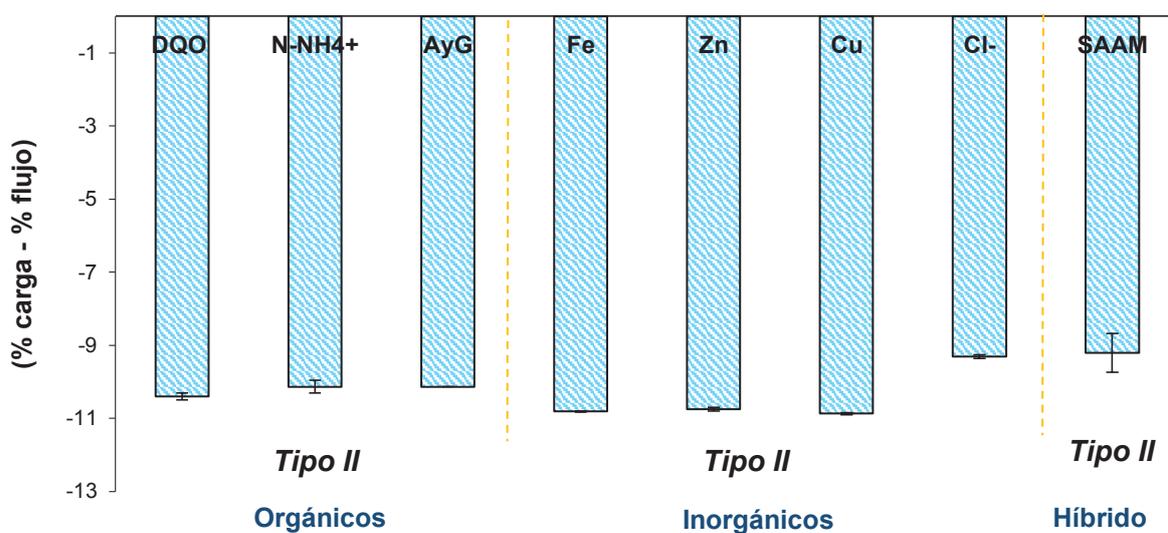
FIGURA 0.19 Segregación de corrientes utilizando el *Sindex* para la fase de enjuague 2



Nota. (1) Valores del escenario 1, (2) Valores del escenario 2, (1-2) Valor promedio dos escenarios
ELABORACIÓN: Salazar K.

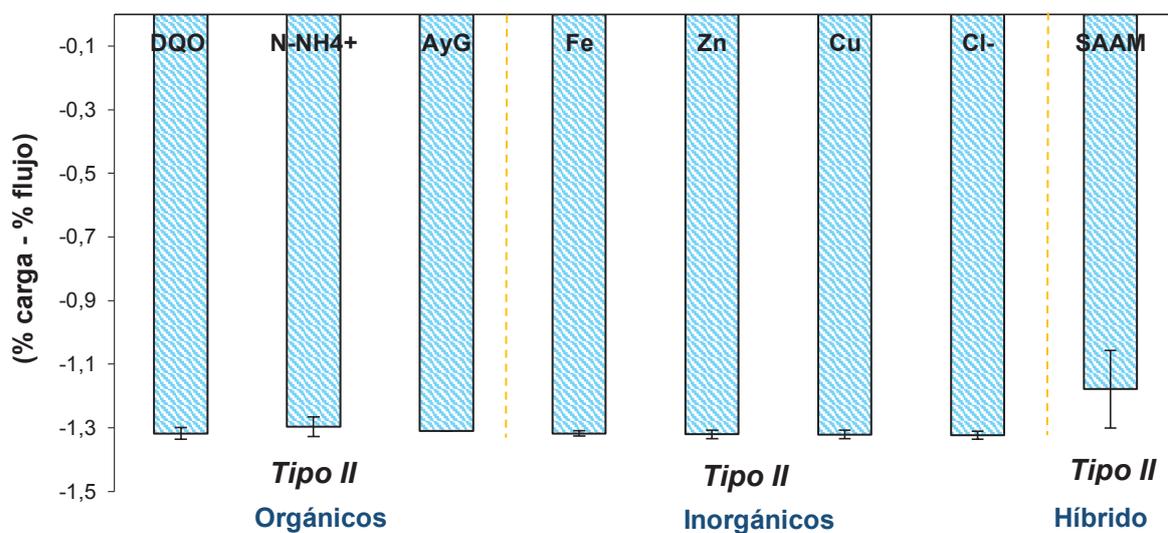
Las descargas líquidas de las fases de enfriamiento (VL₄) y caldero (V₅) reportaron condiciones para ser clasificadas como corrientes tipo II ($S_{index} < 0$) de baja carga, para los tres tipos de parámetros analizados en este estudio. Tal como se ilustra en las Figuras 4.20 y 4.21, respectivamente.

FIGURA 0.20 Segregación de corrientes utilizando el *Sindex* para la fase de enfriamiento



ELABORACIÓN: Salazar K.

FIGURA 0.21 Segregación de corrientes utilizando el *Sindex* para el caldero



ELABORACIÓN: Salazar K.

La Tabla 4.11 presenta, en resumen, los resultados de la evaluación de cada residuo líquido de acuerdo al resultado del *Sindex*, a razón de los parámetros analizados. En general, en el *Escenario 1* ($\text{pH}_{\text{descarga total}} \leq 4,5$) los contaminantes orgánicos e inorgánicos en el decapado ($V_{2.1}$, $V_{2.2}$, $V_{2.3}$) y enjuagues 1 y 2 ($VL_{2.1}$, $VL_{2.2}$) caracterizaron a estos residuos como corrientes altamente cargadas (Tipo I). El resto de parámetros para ambos escenarios, a excepción de la carga de tensoactivos en el enjuague del desengrase (VL_1), evidenciaron que las corrientes del proceso evaluadas tienen baja carga (Tipo II).

TABLA 0.11 Comparación de resultados *Sindex* según el tipo de contaminante

Corriente líquida	<i>Sindex</i>				
	ORGÁNICO		INORGÁNICO		HÍBRIDO
Enjuague desengrase (VL_1)		T II		T II	T I
Decapado ($V_{2.1}$, ($V_{2.2}$), ($V_{2.3}$))		T I		T I	T II
Enjuague 1 ($VL_{2.1}$)	T I (Escenario 1)	T II (Escenario 2)	T I (Escenario 1)	T II (Escenario 2)	T II
Enjuague 2 ($VL_{2.2}$)	T I (Escenario 1)	T II (Escenario 2)	T I (Escenario 1)	T II (Escenario 2)	T II
Enfriamiento (VL_4)		T II		T II	T II
Caldero (V_5)		T II		T II	T II

Nota. (T I) Corrientes líquidas con Alta Carga, (T II) Corrientes líquidas con Baja Carga.

ELABORACIÓN: Salazar K.

- *Evaluación de las corrientes líquidas según su necesidad de tratamiento*

La Tabla 4.12 presenta para cada grupo de parámetros la comparación entre las corrientes tipo I y tipo II con la norma que rige la descarga del residuo líquido, señalando si este es apto para su descarga o en su defecto necesita de un tratamiento previo.

TABLA 0.12 Análisis del requerimiento de tratamiento por tipo de corriente y contaminante

Corriente líquida	Tipo de contaminante										
	ORGÁNICO				INORGÁNICO			HÍBRIDO			
	Tipo	Concentración	Observación	Tipo	Concentración	Observación	Tipo	Concentración	Observación		
Enjuague desengrase (VL ₁)	T II	23,5 mg DQO/L 0,6 mg N-NH ₄ ⁺ /L 8,1 mg AyG/L	Cumple descarga a alcantarillado*	T II	10,9 mg Fe/L 9,5 mg Zn/L 0,07 mg Cu/L 150,1 mg Cl ⁻ /L	Cumple descarga a alcantarillado**	T I	7,04 mg SAAM/L	Requiere tratamiento (tensoactivos)		
Decapado (V _{2.1}), (V _{2.2}), (V _{2.3})	T I	18625 mg DQO/L 3 mg N-NH ₄ ⁺ /L 248,1 mg AyG/L	Requiere tratamiento (DQO y AyG).	T I	53300 mg Fe/L 645 mg Zn/L 1880 mg Cu/L 107x10 ⁴ mg Cl ⁻ /L	Requiere tratamiento (Fe, Zn, Cu y Cl ⁻).	T II	1,25 mg SAAM/L	Requiere tratamiento (tensoactivos)		
Enjuague 1 (VL _{2.1})	T I E 1	T II E 2	111 mg DQO/L 4,5 mg N-NH ₄ ⁺ /L 4,1 mg AyG/L	Cumple descarga a alcantarillado*	T I E 1	T II E 2	262,5 mg Fe/L 282,5 mg Zn/L 6,1 mg Cu/L 1126,6 mg Cl ⁻ /L	Requiere tratamiento (Fe, Zn, Cu y Cl ⁻).	T II	0,35 mg SAAM/L	Cumple descarga a alcantarillado***
Enjuague 2 (VL _{2.2})	T I E 1	T II E 2	64 mg DQO/L 2,7 mg N-NH ₄ ⁺ /L 5 mg AyG/L	Cumple descarga a alcantarillado*	T I E 1	T II E 2	143 mg Fe/L 109,5 mg Zn/L 4,7 mg Cu/L 461,6 mg Cl ⁻ /L	Requiere tratamiento (Fe, Zn, y Cu).	T II	0,32 mg SAAM/L	Cumple descarga a alcantarillado***

Tabla Continuación...

Corriente líquida	Tipo de contaminante								
	ORGÁNICO			INORGÁNICO			HÍBRIDO		
	Tipo	Concentración	Observación	Tipo	Concentración	Observación	Tipo	Concentración	Observación
Enfriamiento (VL4)	T II	6 mg DQO/L 1,5 mg N-NH ₄ ⁺ /L 5,6 mg AyG/L	Cumple descarga a alcantarillado*	T II	1,1 mg Fe/L 2,24 mg Zn/L 0 mg Cu/L 140,2 mg Cl ⁻ /L	Cumple descarga a alcantarillado**	T II	0,36 mg SAAM/L	Cumple descarga a alcantarillado***
Caldero (V5)	T II	2 mg DQO/L 0,2 mg N-NH ₄ ⁺ /L 0 mg AyG/L	Cumple descarga a alcantarillado*	T II	0,8 mg Fe/L 0,7 mg Zn/L 0,01 mg Cu/L 0 mg Cl ⁻ /L	Cumple descarga a alcantarillado**	T II	0,22 mg SAAM/L	Cumple descarga a alcantarillado***

Nota. (T I) Corrientes líquidas con Alta Carga, (T II) Corrientes líquidas con Baja Carga, (E1) Escenario 1, (E2) Escenario 2, y (*), (**), (***) Hace referencia a los límites permitidos respecto a los parámetros normados en la Ordenanza Municipal 404-Resolución No. 0002-SA-2014. (*) 350 mg DQO/L, 30 mg N-NH₄⁺ /L, 70 mg AyG /L; (**) 25 mg Fe/L, 2 mg Zn/L, 2 mg Cu/L, 1000 mg Cl⁻/L; (***) 1 mg SAAM/L. Los parámetros subrayados están normados para la descarga hacia un cauce de agua dulce.

ELABORACIÓN: Salazar K.

Los resultados del anterior apartado presentan el requerimiento de tratamiento para la eliminación de *carga orgánica* en los residuos líquidos procedentes de la fase de decapado ($V_{2.1}$, $V_{2.2}$, $V_{2.3}$) y de *carga inorgánica* para las fases de decapado y enjuagues 1 y 2 ($VL_{2.1}$, $VL_{2.2}$). Además, la necesidad de instalaciones para la eliminación de la *carga híbrida* (tensoactivos) en los residuos líquidos derivados de las operaciones de enjuague desengrase (VL_1) y decapado.

Con la finalidad de eliminar el componente *orgánico* en residuo líquido del decapado agotado, este podría eventualmente ser dirigido hacia un tratamiento secundario tipo biológico. De acuerdo con el *Sindex* las corrientes tipo I ($S_{index} > 0$) presentan potencial para ser tratadas por un proceso anaerobio (Rivela et al., 2008). No obstante, el residuo líquido presentó concentraciones promedio de metales (645 mg Zn/L, 1880 mg Cu/L) superiores a los valores que podrían inhibir o causar interferencia en el proceso biológico anaerobio (400 mg Zn/L, 40 mg Cu/L) (Hayes y Theris, 1978). De igual forma, el pH (0) y la temperatura registrada (17,4 °C) en la corriente evaluada difirieron significativamente, a excepción de la razón C/N (6208), de los rangos óptimos referenciados (pH 6,6 - 7,6; temperatura 20 - 65°C; C/N > 20) (Lorenzo y Obaya, 2005; Yenigun y Demirel, 2013; Rodríguez, 2011). Por lo tanto, en el residuo líquido no existen las condiciones ambientales correctas para el desarrollo de los microorganismos que actúan sobre la materia orgánica vía anaerobia (Da Cámara et al., 2008; Fernández et al., 2002; Tahir y Rauf, 2004). En consecuencia, se omite la posibilidad de utilizar un proceso de este tipo como estrategia de regeneración. Otro medio para tratar los compuestos orgánicos en estos residuos industriales (con material coloidal y disuelto) es la coagulación-floculación (Amuda et al., 2006; Colotta et al., 2003; Crespi, 1996).

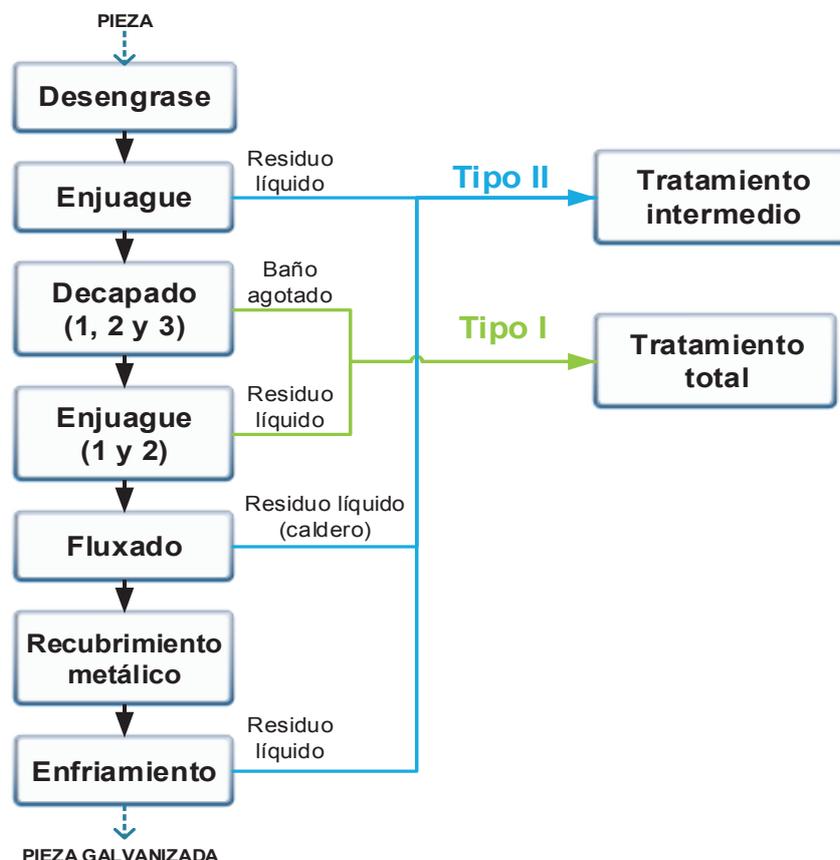
Los residuos líquidos de las fases de enjuague 1 y 2, así como de decapado, requieren de tratamiento tipo físico-químico para la eliminación de su contenido *inorgánico*, especialmente por los metales presentes en los mismos. Las corrientes residuales mencionadas tuvieron un intervalo de pH entre 0 a 5,65; lo que implica que los metales están en su máxima solubilidad; es decir, en forma disuelta (Sanchis, 2010). Las operaciones unitarias de coagulación-floculación y filtración

con membrana son las más adecuadas en este tipo de residuos para eliminar la materia suspendida y soluble, respectivamente (Crespi, 1996; Kurniawan et al., 2006). En el caso de los cloruros, una alternativa para su eliminación es la filtración con membranas (específicamente ósmosis inversa) (Muddasani et al., 2015). Finalmente, el residuo líquido descargado desde la fase de enjuague de desengrase puede ser tratado por coagulación-floculación para eliminar su contenido en tensoactivos (Crespi, 1996).

- *Segregación de los residuos líquidos galvánicos*

Frente al tratamiento de la descarga global, la evaluación de los flujos individuales por medio del *Sindex* identificó la segregación de los residuos líquidos esquematizada Figura 4.22 para su tratamiento específico.

FIGURA 0.22 Posible segregación de las corrientes utilizando el *Sindex*



ELABORACIÓN: Salazar K.

De acuerdo con la Figura 4.22 los residuos líquidos pueden segregarse como:

- a) *Tipo I.* Baños de decapado agotado ($V_{2.1}$, $V_{2.2}$, $V_{2.3}$), enjuague 1 ($VL_{2.1}$) y enjuague 2 ($VL_{2.2}$); como residuos líquidos altamente cargados que requieren un tratamiento total.
- b) *Tipo II.* Enjuague desengrase (VL_1), enfriamiento (VL_4) y caldero (V_5); como residuos líquidos poco cargados que necesitan de un tratamiento menor.

4.2.2.2. Evaluación de la Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos

Los valores de los parámetros evaluados sobre el influente y efluente de cada operación unitaria de la planta de tratamiento, incluyendo sus eficiencias de eliminación, se presentan en la Tabla 4.13. Con base en los resultados reportados, el efluente final de la PT-RILes alcanzó una eficiencia media de eliminación en los parámetros de control, del orden de 63,3 al 99,9%. Estos resultados son satisfactorios para su recirculación en el proceso. Sin embargo, para su descarga hacia el alcantarillado, el pH no se ajusta a las directrices ambientales establecidas (Ordenanza Municipal 404-Resolución No. 0002-SA-2014; 2014). En general, el límite máximo de eliminación de la materia orgánica (DQO), sustancias inorgánicas (CE , Cl^-), nutrientes ($N-NH_4^+$) y metales (Fe , Zn , Cu) estuvo entre el 89,8 y 99,9%. No obstante, los rendimientos más bajos en la eliminación registrados en el proceso de tratamiento, se presentaron en los sólidos (ST , SFT , SST), donde los valores fluctuaron entre 63,3 a 71,8%. Los procesos fisicoquímicos de coagulación química, floculación y sedimentación, de la etapa primaria del tratamiento presentaron una eficiencia de eliminación de contaminantes en un rango de variación de 4,58 a 99,94%, para los cloruros y el hierro, respectivamente. Estas operaciones unitarias se utilizaron para eliminar fundamentalmente ST en suspensión (95,1%) y materia orgánica medida como DQO (83,1%). Mientras que, el resto de procesos fisicoquímicos, de la etapa de tratamiento terciario, es decir, filtración, mezcla-sedimentación, y neutralización del pH (cloración) fueron más adecuados para eliminar los metales, tales como: Fe (68,6-99,3%), Zn (81,5-99,4%), Cu , (50-97,0%). Así como nutrientes: $N-NH_4^+$, (83,6-97,8%); sustancias inorgánicas: CE , (83,2-91,5%) y Cl^- , (36,7-82,1%), y tensoactivos (89,9%).

TABLA 0.13 Parámetros evaluados en las tecnologías de tratamiento de los efluentes galvánicos

Etapa	Operación unitaria	ID	pH	T (°C)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SFT (mg/L)	CE (µs/cm)	Cl- (mg/L)	DQO (mg/L)	SAAM (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	Fe (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)
Preliminar	Homogenización de caudales	-	2,8	19,9	1336	78	1238	6270	1240,8	226	6,10	21,8	312,5	375,0	2,4
Primaria	Coagulación-floculación-sedimentación	Ci	12,77	16,3	3392	1062	2382	7490	704,75	243	7,52	6,3	300	184,0	0,85
		Cf	12,9	16,2	3780	52	3682	12070	672,49	41	3,70	9,6	0,17	2,38	0,12
		%R	-	-	-	(95,10)	-	-	(4,58)	(83,13)	(50,72)	-	(99,94)	(98,71)	(85,88)
	Filtración (Membranas filtrantes+filtro)	Ci	12,89	16,2	4320	760	3582	12660	1067,1	86	2,42	10,7	167,5	227,5	1,35
		Cf	12,18	15,5	1624	10	1614	2130	674,97	25	2,42	1,75	1,14	1,37	0,04
		%R	-	-	(62,41)	(98,68)	(54,94)	(83,18)	(36,74)	(70,93)	(0)	(83,64)	(99,32)	(99,40)	(97,04)
Terciaria	Mezcla-Sedimentación	Cf	12,53	16,2	2032	26	1980	5270	707,23	64	2,57	7,2	1,02	1,35	0,02
		Ci	12,53	16,2	2032	26	1980	5270	707,23	64	2,57	7,2	1,02	1,35	0,02
	Neutralización o corrección de pH (Cloración)	Cf	9,39	16,7	476	22	454	450	126,56	5	0,26	0,16	0,32	0,25	0,01
%R		-	-	(76,57)	(15,38)	(77,07)	(91,46)	(82,11)	(92,19)	(89,87)	(97,78)	(68,63)	(81,48)	(50,00)	
% Remoción total			-	-	(64,37)	(71,79)	(63,33)	(92,82)	(89,80)	(97,79)	(95,73)	(99,27)	(99,90)	(99,93)	(99,58)

Nota. () Hace referencia a la eficiencia de eliminación, (Ci) Concentración inicial, (Cf) Concentración final, (%R) Porcentaje de remoción en la operación unitaria, (T) Temperatura, (SAAM) Tensoactivos

ELABORACIÓN: Salazar K.

- *Criterios de tratabilidad de las operaciones unitarias de la PT-RILes*

La Tabla 4.14 presenta los criterios de tratabilidad de cada operación unitaria que integra la PT-RILes de la planta de galvanizado.

TABLA 0.14 Criterios de tratabilidad de las operaciones unitarias de la PT-RILes

Etapa	Operación unitaria	Criterios de tratabilidad
Preliminar	Homogenización	Tiempo de retención: 1,5-2,5 horas
	Sedimentación primaria	Temperatura: >20°C
Primario	Mezcla rápida	pH>11 para la precipitación de metales como hidróxidos y la co-precipitación como floc sedimentable.
	Coagulación-floculación-clarificación	
Terciario	Filtración (Membrana filtrante)	Influyente requiere: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pre-filtración (turbiedad) ▪ Zn 10-20% p/p; Cu 10-20% p/p ▪ Temperatura: 5-45 °C ▪ pH: 2-11 (por encima del valor existe deterioro de membrana, por ataque químico).
	Sedimentación primaria	Temperatura: >20°C
	Neutralización del pH	-

FUENTE: ASIMET y CPL (2014); Melcalf y Eddy (1995), Miranda (2011); Sotto (2008)

ELABORACIÓN: Salazar K.

4.2.2.3. Tratamiento diferenciado de los influentes de la Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos

El tratamiento de los residuos líquidos para las corrientes Tipo I, decapado y sus respectivos enjuagues (V_{2.1}, V_{2.2}, V_{2.3}, VL_{2.1} y VL_{2.2}), correspondió con una etapa de tratamiento preliminar que incorporó las operaciones unitarias de homogenización de caudal y mezclado. Operaciones que de acuerdo a la evaluación de la PT-RILes elevan el pH (12,8) al rango óptimo (> 11) para que en función de la solubilidad de los metales, éstos precipiten (pH entre 8-10) (Cortina et al., 2003). La etapa primaria correspondió con una operación de coagulación-floculación. La cual se puede justificar debido a que los sólidos filtrables, es decir, partículas disueltas (metales, cloruros) y coloidales, presentaron en los residuos líquidos de estas fases una incidencia que osciló entre 97,1 a 98,6% respecto al contenido total de sólidos. Lo cual, se relaciona directamente a su elevado contenido en metales (ver tabla 4.6)

(Acosta, 2006; Labanda y Llorens, 2008). Por tanto, la eliminación de estas partículas puede realizarse efectivamente mediante procesos de coagulación-floculación (Acosta, 2006; Jaramillo y Rodríguez, 2015). En el caso real se encontró que esta unidad eliminó el contenido en metales en un rango entre 85,9 a 99,9%. No obstante, para facilitar su aglomeración se requirió la adición de un polielectrolito (compuestos complejos de alto peso molecular coadyuvantes de floculación) (Acosta, 2006). La etapa de tratamiento terciario comprendió las operaciones de filtración con membrana filtrante y filtro, sedimentación y neutralización del pH. El ensuciamiento de la membrana filtrante pudo minimizarse al combinar esta tecnología de separación con el proceso de coagulación-floculación. La coagulación previa mejora en forma simultánea la eficacia de eliminación y reduce incrustaciones en la membrana (Labanda y Llorens, 2008).

El tratamiento definido para los residuos líquidos procedentes del enjuague del desengrase (VL₁) correspondió a un tratamiento primario y terciario, que incluyó las operaciones unitarias de coagulación-floculación, sedimentación primaria y neutralización de pH (cloración). Este residuo presentó concentraciones importes en tensoactivos (7 mg/L) los cuales pueden ser removidos (85-99%) por coagulación-floculación (Aboulhassan et al., 2006; Crespi, 1996). En la práctica esta operación junto con la cloración garantizaron la eliminación de este parámetro (95%) para las actividades de recirculación en el proceso de galvanizado ($C_{ent} < 1$ mg/L). Adicionalmente, el contenido de sólidos disueltos y coloidales en estos residuos significó cerca del 92% frente a los sólidos totales. Las corrientes Tipo II restantes, enfriamiento y caldero (VL₄ y V₅), con base en los resultados de la caracterización ambiental, el único parámetro que impide su descarga directa al alcantarillado es la temperatura (52,6 a 61,2 °C) que excede el valor normado (<40 °C) (Norma OM 404, 2014). Por tanto, el tratamiento que requirieron fue un acondicionamiento térmico en un tanque acondicionador que le permita disminuir su temperatura.

La Tabla 4.15 presenta las corrientes líquidas agrupadas en función de su carga y necesidad de tratamiento. De igual forma, señala el conjunto de operaciones

unitarias adecuadas para eliminar los distintos tipos de contaminantes presentes en el residuo líquido según sus características químicas y físicas.

TABLA 0.15 Segregación de corrientes en función de la carga y tratamiento

Residuo líquido	Tipo	Proceso	Operación unitaria
Decapado (V _{2.1}), (V _{2.2}), (V _{2.3}) Enjuague 1 (VL _{2.1}) Enjuague 2 (VL _{2.2})	Tipo I	Físico y químico	HQ + M + CQ + FM + F+ S + C (Tratamiento total)
Enjuague desengrase (VL ₁)	Tipo II	Físico y químico	CQ + F + S + C (Tratamiento intermedio)
Enfriamiento (VL ₄) Caldero (V ₅)			AT (Tratamiento intermedio)

Nota. (HQ) Homogenización de caudal, (M) Mezcla, (CQ) Coagulación Química-Floculación, (FM) Filtración con membranas, (F) Filtro, (S) Sedimentación, (C) Cloración o neutralización pH, (AT) Acondicionamiento término.

ELABORACIÓN: Salazar K.

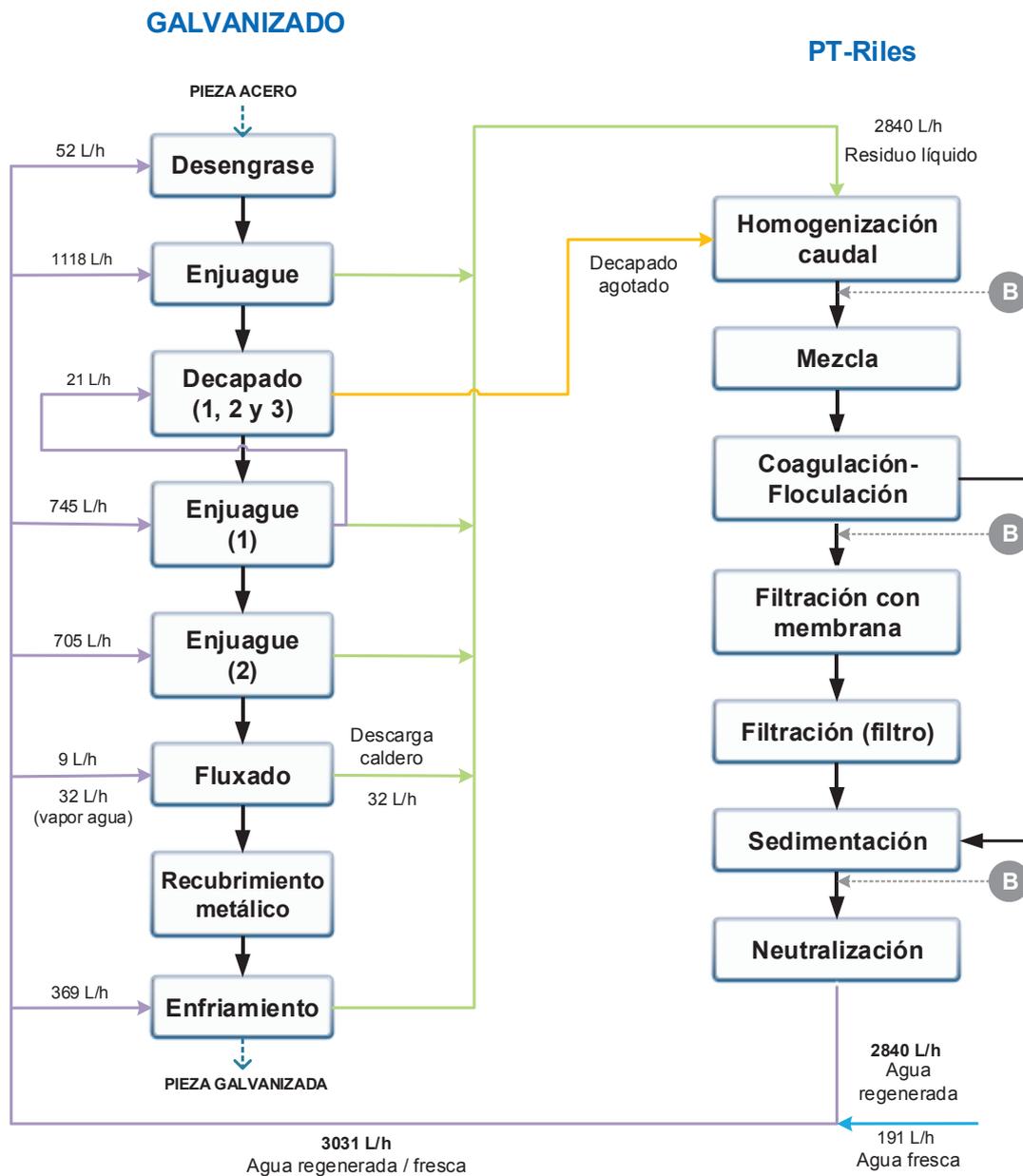
4.3. ESCENARIOS PLANTEADOS PARA LA CONFIGURACIÓN DE LA RED DE CORRIENTES LÍQUIDAS

4.3.1. ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS

4.3.1.1. Escenario actual

La Figura 4.23 presenta la actual disposición de la red de corrientes líquidas dentro del proceso productivo. La demanda de agua para las actividades del proceso ascendió a los 3031 L/h, misma que correspondió con una descarga de residuos líquidos en torno a los 2840 L/h. El sistema cuenta con un reciclaje del agua cercano al 94%. Donde la práctica estándar de este modelo junta las distintas corrientes de residuos líquidos en una sola corriente (V_{6.2}) tratada en la PT-RILes, posteriormente se incorporan nuevamente a la red de corrientes líquidas del proceso productivo.

FIGURA 0.23 Escenario actual de la red de corrientes líquidas



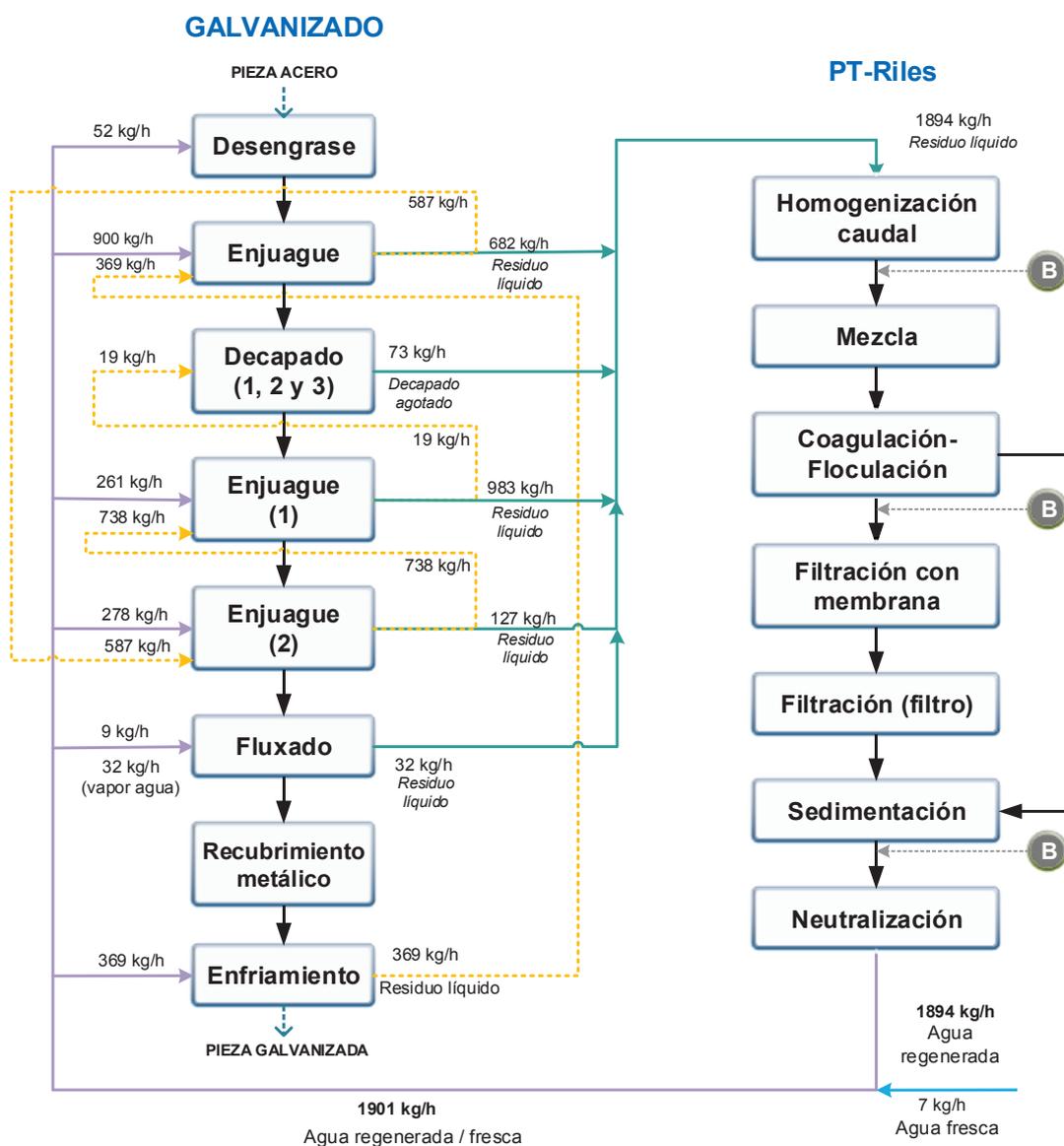
Nota. (B) Bombeo, (Línea morada) Ingreso de agua fresca; (Línea verde) Descarga residuo líquido; (Línea amarilla) Descarga de residuos líquidos decapado, (Línea celeste) Ingreso de agua fresca en el proceso para compensar el porcentaje de consumo/pérdida de agua
ELABORACIÓN: Salazar K.

4.3.1.2. Escenario I: Flujo mínimo de agua

La Figura 4.24 expone la configuración de la red de corrientes líquidas, que incluye dos enfoques esenciales: reúso y regeneración-reciclaje. En el esquema, el reúso de los residuos líquidos de las fases de enjuague alcanza un valor igual a 1808 L/h

(90,3%). Con esta estrategia, el consumo de agua fresca se redujo en un 37,3% (1130 L/h) y subsecuentemente la descarga de residuos líquidos disminuyó un 36,9% (1050 L/h). Lo cual, implica una reducción en el costo por tratamiento (36,9%). Por otra parte, la demanda total de agua estuvo cercana a 1901 L/h y se alcanzó un reciclaje del agua hasta del 94,2% (1894 L/h).

FIGURA 0.24 Escenario I para la configuración de la red de corrientes líquidas



Nota. (B) Bombeo, (Línea morada) Ingreso de agua fresca; (Línea azul) Descarga del residuo líquido; (Línea amarilla) Reúso de residuos líquidos, (Línea celeste) Ingreso de agua fresca en el proceso para compensar el porcentaje de consumo/pérdida de agua

ELABORACIÓN: Salazar K.

4.3.1.3. Escenario II: Tratamiento diferenciado de residuos líquidos

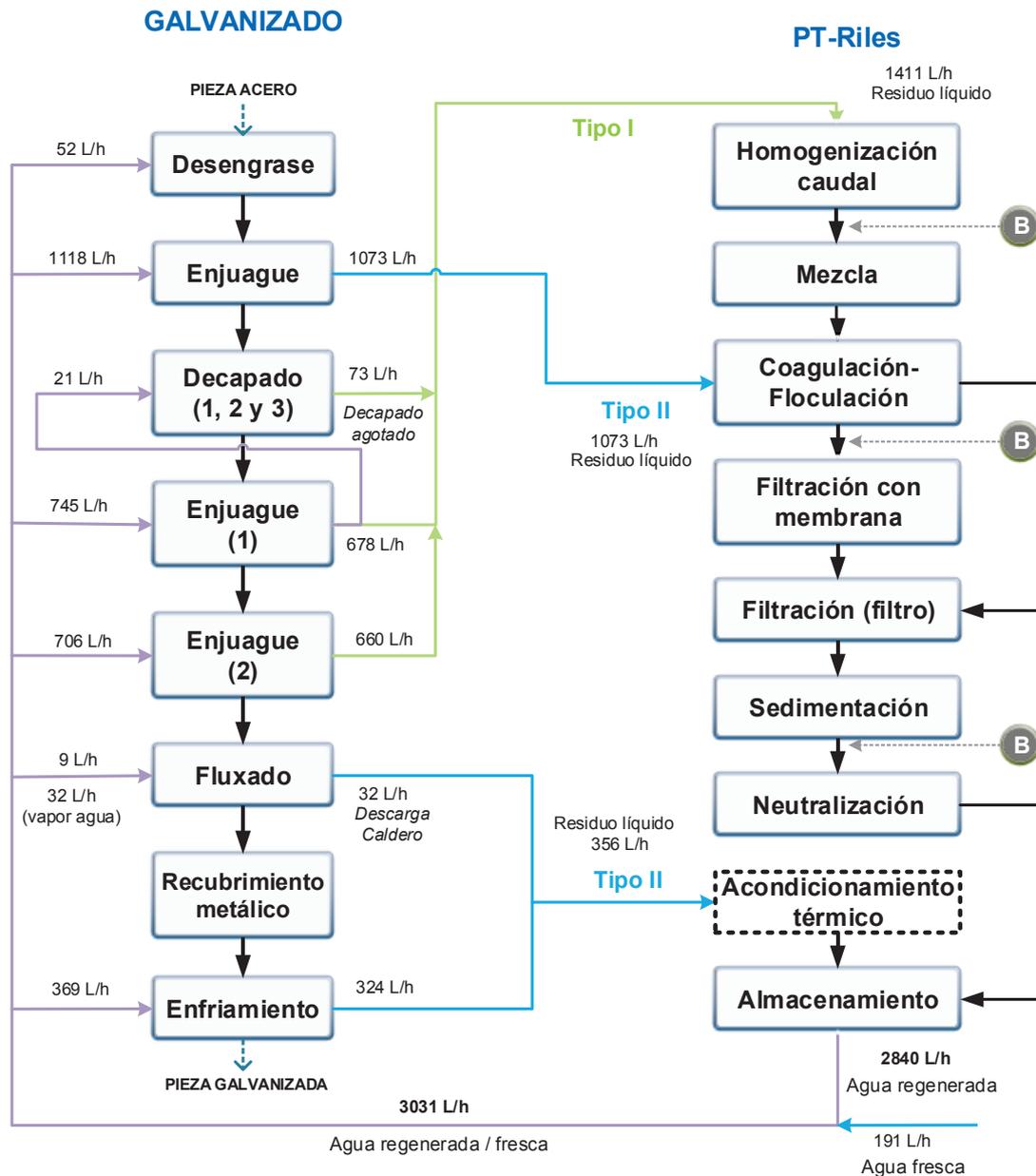
La Figura 4.25 detalla el modelo de red obtenido de la evaluación de las corrientes líquidas a partir de los resultados previos respecto a la agrupación según el *Sindex*. La red de corrientes propuesta en este escenario agrupa al baño de decapado agotado ($V_{2.1}$, $V_{2.2}$, $V_{2.3}$) junto con sus respectivos enjuagues ($VL_{2.1}$ y $VL_{2.2}$) como residuos líquidos que requieren de un proceso de regeneración total para su posterior reciclaje en el proceso. Por ende, y como se analizó en apartados anteriores, ingresan en la primera operación unitaria de la PT-RILes. No obstante, los residuos líquidos del enjuague del desengrase (VL_1), caldero (V_5) y enfriamiento (VL_4), con menor carga ingresan en una etapa intermedia del tratamiento. Al desviar estos residuos líquidos individuales a procesos intermedios, no sólo se optimiza su tratamiento, sino que se disminuye el consumo de insumos necesarios para su regeneración, como: agentes coagulantes (12,5%), sustancias acondicionadoras de pH, NaOH y lechada de cal, (50,2%) y HCl (12,5%). Esta disminución representaría un ahorro por costos de tratamiento superior al 17,8% y evitaría un gasto energético de 219 kWh/mes. Adicionalmente, considerando el consumo de agua y las pérdidas del proceso, el escenario señala la factibilidad de recircular por encima de un 93,7% (2840 L/h) del agua utilizada en las actividades de acabado superficial.

4.3.1.4. Escenario III: Flujo mínimo de agua y tratamiento diferenciado de los residuos líquidos

El diseño obtenido en este escenario se muestra en la Figura 4.26. La demanda total de agua ascendió a 1901 L/h y la descarga de residuos líquidos fue de 1790 L/h. En el mismo, la demanda de agua dulce se redujo en un 37,3% (1130 L/h) frente al caso base (3031 L/h). Este hecho se debió a la maximización del reúso de residuos líquidos (90,3%), con mayor presencia en la fase de Enjuague 1 del Decapado (738 L/h, 43,4%). Sin embargo, la estructura de la red es bastante compleja con algunos de los flujos de residuos líquidos relativamente bajos (menos de 32 L/h). Junto con la eliminación del consumo de agua dulce, se observó que el tratamiento selectivo de los residuos líquidos emerge en menores costos por

tratamiento (reducción 41,3%). De forma que el consumo de los agentes acondicionadores de pH (NaOH + cal) y coagulantes presentan una reducción en torno a 61,1% y 38,1% respectivamente, mientras que el químico neutralizante (HCl) tuvo un valor de no consumo igual a 38,1%.

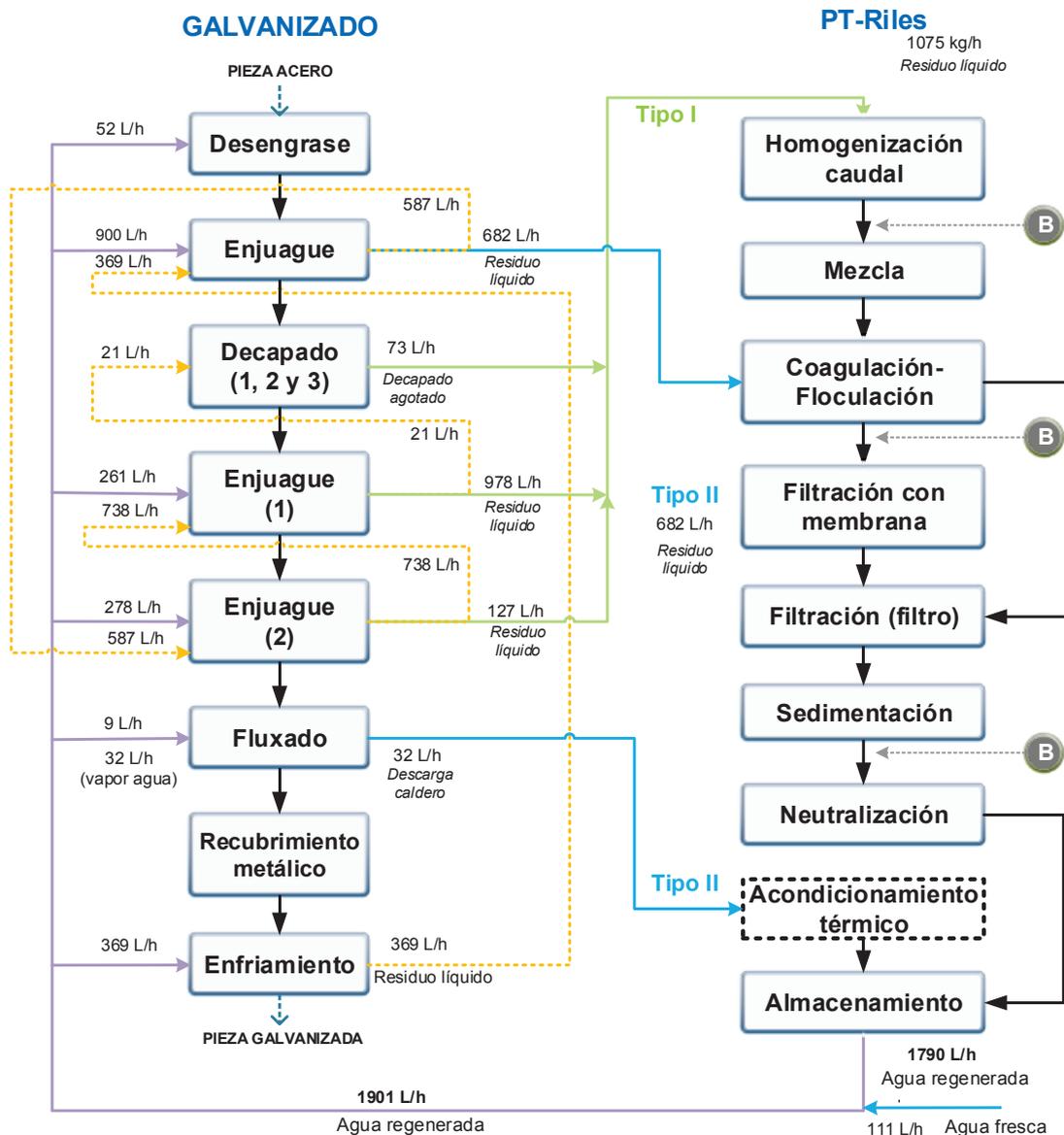
FIGURA 0.25 Escenario II para la configuración de la red de corrientes líquidas



Nota. (B) Bombeo, (Línea morada) Ingreso de agua fresca; (Línea azul) Descarga del residuo líquido Tipo II; (Línea verde) Descarga del residuo líquido Tipo I, (Línea celeste) Ingreso de agua fresca en el proceso para compensar el porcentaje de consumo/pérdida de agua

ELABORACIÓN: Salazar K.

FIGURA 0.26 Escenario III para la configuración de la red de agua



Nota. (B) Bombeo, (Línea morada) Ingreso de agua fresca; (Línea azul) Descarga residuo líquido Tipo II; (Línea verde) Descarga residuo líquido Tipo I; (Línea amarilla) Reúso de residuos líquidos, (Línea celeste) Ingreso de agua fresca para compensar consumo/pérdida de agua
ELABORACIÓN: Salazar K.

4.3.2. COMPARACIÓN DE ESCENARIOS

La Tabla 4.16 y la Figura 4.27 exponen un resumen de los valores porcentuales respecto a los criterios de comparación analizados entre cada escenario.

Los escenarios I y III ilustraron un enfoque de diseño de la red de corrientes líquidas que aborda el reúso máximo de los residuos líquidos (90%; 1716 L/h); o de forma equivalente, la minimización de la actual tasa de consumo de agua (3031 L/h) en un 37% (1130 L/h). Lo que implicó una disminución de la descarga de residuos líquidos en un valor por encima del 37% (1050 L/h). No obstante, los diseños para cumplir estos objetivos en estos escenarios resultaron bastante complejos para su implementación. Por otra parte, el reciclaje del agua presentó un valor potencial de 94,2% (escenario I y III) frente al caso base 93,7% (escenario actual).

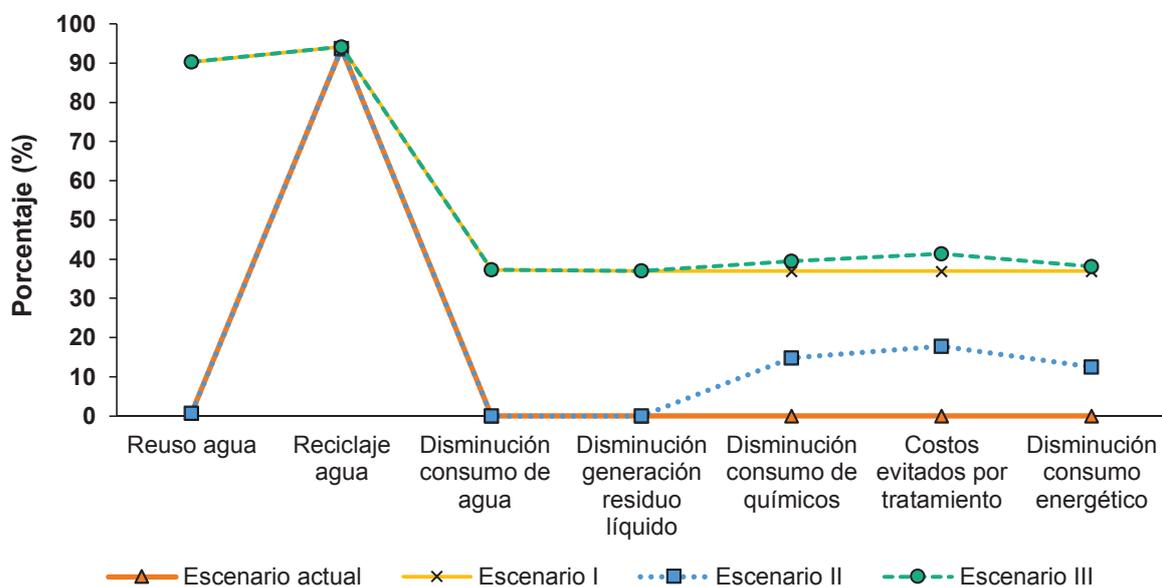
En función de la reducción general de los costos por tratamiento de residuos líquidos del proceso, se observó dentro del análisis una diferencia amplia entre los escenarios de 17,6% (escenario II), 36,9% (escenario I), y 41,3% (escenario III). En estos valores se incluye el costo energético evitado por bombeo y dosificación de químicos en el tratamiento. Adicionalmente, al comprar las emisiones de CO₂ equivalentes evitadas por el menor gasto energético, los escenarios mostraron una reducción del orden de 5,4 (escenario II) a 16,5 (escenario III) kg CO₂ eq/día.

TABLA 0.16 Comparación entre los escenarios propuestos

Aspecto	Unidad	Escenario actual	Escenario I	Escenario II	Escenario III
Caudal de agua fresca	L/h	3031	1901	3031	1901
Reúso del agua	%	0,70	90,26	0,70	90,26
Reciclaje del agua	%	93,69	94,15	93,69	94,15
Disminución consumo de agua fresca	%	0	37,28	0	37,28
Disminución generación residuo líquido	%	0	36,98	0	36,98
Disminución consumo de químicos	%	0	36,96	14,83	39,51
Costos de tratamiento evitados	%	0	36,96	17,83	41,33
Disminución consumo energético	%	0	36,96	12,53	38,10
Emisiones evitadas	kg CO ₂ eq/día	0	17,16	5,41	16,45

ELABORACIÓN: Salazar K.

FIGURA 0.27 Comparación entre los escenarios propuestos



ELABORACIÓN: Salazar K.

4.3.3. SELECCIÓN DEL ESCENARIO ÓPTIMO

El escenario III presentó los mayores beneficios ambientales (reúso residuo líquido 90%, reciclaje del agua 94%, y emisiones evitadas 16,5 kg CO₂ eq/día) y económicos (consumo químico, gasto energético) para la red de corrientes líquidas de planta de galvanizado evaluada, en comparación al resto de escenarios. Respecto al escenario actual, la solución final que propone esta red redujo el consumo de agua fresca y regenerada en un 37%, que representó a una tasa de agua no consumida próxima a 1130 L/h. Con lo cual, se disminuye el actual costo por tratamiento de residuos líquidos en aproximadamente un 41%, este rubro fue alcanzado por la disminución del residuo líquido generado (37%) y por la supresión de químicos utilizados (39,5%) y gasto energético (38%).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Por cada tonelada de acero galvanizado se requiriere aproximadamente 104,5 kg de productos químicos y 2477 L de agua fresca. Las fases de mayor consumo de insumos fueron las de recubrimiento metálico (66%) y decapado (34%); mientras que, las fases con la mayor demanda de agua correspondieron a los enjuagues (95%). El consumo por proceso fue prácticamente despreciable (5%, 121 L/t_{ag}). La generación total registrada de residuos en estado sólido fue del orden de 14,5 kg/t_{ag} y la descarga de residuos líquidos alcanzó un volumen superior a los 2286 L/t_{ag}. Las operaciones de recubrimiento metálico y enjuague fueron las principales fuentes de generación de los residuos sólidos (90%) y residuos líquidos (98%), respectivamente. En torno a un 10,2% (1,5 kg/t_{ag}) del total de residuos sólidos estimados estuvo asociado a las operaciones de mantenimiento de los tanques (lodos).
- Los residuos líquidos galvánicos se caracterizaron por su variación en cantidad y composición, presentando bajo contenido orgánico (DQO 37-73 mg/L), importantes valores en sólidos (1133 mg/L), pH ácido (2,9-6,6) y un elevado contenido de Cl⁻ (<1067 mg/L). Los metales pesados detectados fueron Zn (0,74-645 mg/L), Fe (0,77-5330 mg/L) y Cu (0-1880 mg/L). El efluente del enjuague posterior al desengrase constituyó un significativo aporte en tensoactivos (7 mg/L) al flujo de residuo líquido global. Los baños de decapado se destacaron por su contenido promedio elevado en Zn (645 mg/L) y Fe (53,3 g/L). Los residuos procedentes de los enjuagues posterior al decapado supusieron una importante fuente contaminante en metales (Zn = 282,5 y 109,5 mg/L, Fe = 262,5 y 143 mg/L, y Cu = 6,1 y 4,7 mg/L; respectivamente) y sólidos (ST = 2085 mg/L y 1018 mg/L; respectivamente). Mientras que, las descargas de las fases de enfriamiento y caldero (52,6 - 61,2 °C) exhibieron un carácter contaminante inferior respecto a las otras corrientes de lavado. Por tanto, las alternativas de

gestión y tratamiento deben ser evaluadas sobre la base de los resultados reportados.

- En esta investigación, con la aplicación del método *Water Pinch* para contaminantes únicos, el flujo mínimo de agua fresca asignado a las operaciones de enjuague (AL_1 , $AL_{2.1}$, $AL_{2.2}$, AL_4) en un sistema con reúso de los residuos líquidos (VL_1 , $VL_{2.2}$, VL_4) fue de 1808 L/h, 1551 L/h y 1807 L/h, para SFT, Zn y DQO, respectivamente. La cantidad de agua fresca disminuyó en un rango comprendido entre 38,5 a 47,2% (1130 – 1386 L/h). La conexión de la nueva red logró el reúso de los residuos líquidos procedentes de las fases de enfriamiento (100%, 369 L/h), enjuague de desengrase (46,3%, 587 L/h) y enjuague 2 del decapado (83,3%, 738 L/h).
- Las significativas cargas orgánicas e inorgánicas presentes en el decapado ($V_{2.1}$, $V_{2.2}$, $V_{2.3}$) y carga inorgánica en los enjuagues 1 y 2 ($VL_{2.1}$, $VL_{2.2}$) caracterizaron a estos residuos como corrientes Tipo I ($S_{index} > 0$). La unidad de regeneración correspondió a un tratamiento físico-químico que incluyó las operaciones unitarias de homogenización, mezcla, coagulación-floculación, filtración, sedimentación y neutralización de pH. Mientras que, los residuos líquidos de las fases de enjuague de desengrase (VL_1), enfriamiento (VL_4) y caldero (V_5) se definieron como corrientes Tipo II ($S_{index} < 0$) por su baja carga. Por lo tanto, estas corrientes líquidas son viables para segregación hacia las operaciones de tratamiento de coagulación-floculación, sedimentación y neutralización (VL_1) y acondicionamiento térmico (VL_4 , V_5). En ambos casos, esto permitió asegurar su recirculación (regeneración-reciclaje) al proceso de galvanizado.
- Al incorporar el criterio de segregación de corrientes en las diferentes configuraciones propuestas para la red de agua industrial, se determinó que el máximo reúso directo es próximo al 90% (Escenario I y III). El reciclaje obtuvo un valor cercano a 94% (Escenario I, II y III). Mientras que, el enfoque de minimización del consumo de agua fresca/regenerada y generación de residuos líquidos fue de 37,3% y 36,9% (Escenario II-III) respectivamente. Sin embargo, el sistema de distribución de agua óptimo se presentó en el Escenario III.
- La aplicación simultánea de las estrategias presentadas en este estudio permitieron configurar un sistema de asignación de agua fresca más eficiente,

basado en la integración de las fases que utilizan agua en la industria galvánica. La optimización global (Escenario III) se tradujo tanto en beneficios ambientales (39,5% consumo de insumos evitado, 37,3% agua fresca y regenerada no consumida, 16,5 kg CO_{2eq}/día no emitido) como económicos (41,3% gastos evitados por tratamiento).

5.2. RECOMENDACIONES

- Previo a evaluar las oportunidades de reutilización de residuos líquidos se recomienda comprender detalladamente cada operación prestando especial atención a su carácter contaminante, esto para que el proceso no se vea afectado negativamente. El entendimiento del proceso debería cubrir una amplia gama de criterios, tales como las interacciones entre las unidades de tratamiento y entre las operaciones del proceso que utilizan agua, restricciones propias del proceso, operaciones con o sin transferencia de masa, operaciones continuas o discontinuas, entre otras.
- La caracterización de las muestras en estado líquido deberían considerar la toma de las mismas en los escenarios del proceso productivo, es decir, en los diferentes picos de productividad.
- Si bien el índice de segregación brinda una idea efectiva para evaluar el tipo de tratamiento para los residuos individuales, sus resultados deben ser comparados con la realidad de las instalaciones de la PT-RILes, de manera que en la práctica pueda ser implementado con facilidad.
- Se recomienda considerar el flujo de agua real dentro del proceso productivo dentro del análisis *Water Pinch*, para lo cual se toma en cuenta el tiempo de operación de las fases con potencial de reúso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboulhassan, M., Souabi, S., Yaacoubi, A., y Baudu, M. (2006). *Removal of surfactant from industrial wastewaters by coagulation flocculation process. International Journal of Environmental Science & Technology*, 3(4), 327-332.
- Acosta, G., Barrera, C., Bourdón, A., y Cuervo, E. (2013). *La Electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. Facultad de Ciencias Básicas*, 9(2), 306-318.
- Ajersch, F., Ilinca, F., Héту, J., y Goodwin, F. (2005). *Numerical Simulation of Flow, Temperature and Composition Variations in a Galvanizing Bath. Canadian Metallurgical Quarterly*, 44(3), 369-378.
- Aldana, P., y Pacheco, W. (2014). *Evaluación del residuo de decapado de piezas metálicas como coagulante en las aguas residuales de la industria de curtido (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle, Bogotá*, 1-121.
- Alva-Argáez, A., Kokossis, A. C., y Smith, R. (2007). *A conceptual decomposition of MINLP models for the design of water-using systems. International Journal of Environment and Pollution*, 29(1-3), 177-205.
- Amuda, O., Amoo, I., y Ajayi, O. (2006). *Performance optimization of coagulant/flocculant in the treatment of wastewater from a beverage industry. Journal of hazardous materials*, 129(1-3), 69-72.
- Angel, M., y Cabrera, L. (2017). *Desarrollo de una propuesta de mejora para la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa de lácteos inversiones FASULAC LTDA (Tesis de pregrado). Fundación Universidad de América, Bogotá*, 1-196.
- APHA-AWWA-WPCF. (2012). *Standard Methods for examination of water and wastewater. 22th Ed. Washington, USA: American Public Health Association*, 1-1360.
- ASIMET, Asociación Chilena de Industrias Metalúrgicas y Metalmeccánicas. (2013). *Diagnóstico y propuesta de acuerdo de producción limpia : Sector galvanizado (L1-24-2012)*, 1-119.
- ASIMET, Asociación Chilena de Industrias Metalúrgicas y Metalmeccánicas y CPL, Consejo Nacional de Producción Limpia. (2014). *Guía para el manejo de aguas de proceso y de servicios acuerdo. Acuerdo de producción limpia sector galvanizado*, 5-33.

- Ates, E., Orhon, D., y Tünay, O. (1997). *Characterization of tannery wastewaters for pretreatment-selected case studies*. *Water Science and Technology*, 36(2-3), 217-223.
- Avila, F., y Osorio, L. (2016). *Propuesta de tratamiento para los residuos sólidos generados durante el proceso de cincado de la empresa de recubrimientos galvánicos de Colombia (Tesis de pregrado)*. Fundación Universidad de América, Bogotá, 1-134.
- Balla, W., Rabah, A., y Abdallah, B. (2017). *Pinch analysis of sugarcane refinery water integration*. *Sugar Tech*, 20(2), 122-134.
- Bao, S., Tang, L., Li, K., Ning, P., Peng, J., Guo, H., y Liu, Y. (2016). *Highly selective removal of Zn (II) ion from hot-dip galvanizing pickling waste with amino-functionalized Fe₃O₄@ SiO₂ magnetic nano-adsorbent*. *Journal of colloid and interface science*, 462, 235-242.
- Berradi, M., Chabab, Z., Arroub, H., Nounah, H., El Harfi, A. (2014). *Optimization of the coagulation/flocculation process for the treatment of industrial wastewater from the hot dip galvanizing of steel*. *J. Mater. Environ. Sci*, 5(2), 360-365.
- Bolaños, E. Q., Tejada, C., Ruíz, V. (2014). *Remediación de aguas contaminadas con cromo utilizando diferentes biomateriales residuales*. *Revista Ciencias e Ingeniería al Día*, 9(1), 25-42.
- Caldera, Y. (2009). *Eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria avícola (Tesis doctoral)*. Tecana American University, Cabimas, 1-137.
- Cascaret, D., Pérez, N., Marañón, A., y Bajo, R. (2009). *Caracterización físico-química de las aguas residuales de la planta galvánica, empresa conformadora «30 de Noviembre»*. *Revista Cubana de Química*, 21(2), 21-28.
- CE, Comisión Europea. (2006). *Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC)*. Disponibles en la *Industria de Procesos de Metales no Férricos*. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente, España, 53-188.
- Chabalina, L. (2002). *Propuesta de tecnología para el tratamiento de residuales galvánicos*. In *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 28, 1-7.
- Chávez, Á., Cristancho, D. L., y Ospina, É. A. (2009). *Una Alternativa Limpia para el Tratamiento de las Aguas Residuales Galvánicas: Revisión Bibliográfica*. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(14), 39-50.

- Colotta, G., Nacional, U., y San, M. De. (2003). *Tratamiento Físico-Químico De Aguas Residuales*. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 6(2), 64-71.
- Comisión Ambiental Metropolitana. (1998). *Manual de minimización, tratamiento y disposición: Concepto de manejo de residuos peligrosos e industriales para el giro de la galvanoplastia*. México DF, 1-124.
- Crespi, M. (1996). *Depuración de las aguas residuales en la industria de los tensioactivos*. *Boletín INTEXTER*, 1(110), 49-59.
- Culqui, N. (2015). *Diseño e implementación de una planta piloto para el tratamiento de efluentes líquidos generados en los laboratorios del departamento de metalurgia extractiva proyecto (Tesis de pregrado)*. *Escuela Politécnica Nacional, Quito*, 1-210.
- Da Cámara, L., Hernández, M., y Paz, L. (2008). *Manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias*, 1-11.
- Dakwala, M., Mohanty, B., y Bhargava, R. (2011). *Waste Water Minimization of Starch Industry Using Water Pinch Technology*. *3rd International Workshop Advances in Cleaner Production*, 1-12.
- Delvasto, P., Casal-Ramos, J., González-Jordán, O., Durán-Rodríguez, N., Domínguez, J. R., y Moncada, P. (2012). *Caracterización de residuos sólidos procedentes de dos procesos distintos de galvanizado en caliente por inmersión*. *Revista de Metalurgia*, 48(1), 34-44.
- El-Halwagi, M., y Sheley, M. (2000). *Mass integration for the optimal design of optimal recovery and allocation of infinite pollutants*. *American Chemical Society. Spring Meeting Session*.
- Espinoza-Quiñones, F., Módenes, A., Theodoro, P., Palácio, S., Trigueros, D., Borba, C., y Kroumov, A. (2012). *Optimization of the iron electro-coagulation process of Cr, Ni, Cu, and Zn galvanization by-products by using response surface methodology*. *Separation Science and Technology*, 47(5), 688-699.
- Fabelo, J., Gonzalez, M., Gónzalez, E. (2013). *Análisis del manejo eficiente del agua y la energía en una destilería de etanol*. *Revista Centro de Azúcar*, 40(4), 1-10.
- Fajardo, L. (2014). *Remoción selectiva de metales pesados del agua residual proveniente del proceso de decapado (Tesis de pregrado)*. *Universidad de la Salle, Bogotá*, 1-39.

- Fernández, G., Vázquez, E., y Martínez, P. (2002). *Inhibidores del proceso anaerobio : compuestos utilizados en porcicultura*. *Ingeniería*, 6(3), 67-71.
- Ferrer, A. (2003). *Intoxicación por metales Metal poisoning*. *ANALES Sis San Navarra*, 26(1), 141-153.
- FLACSO, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, y MIPRO, Ministerio de Industrias y Productividad. (2012). *Centro de Investigaciones Económicas y de la Micro, Pequeña y Mediana Empresas. Estudio de caso sector metalmeccánica: Industrias Galvano*, 1-29.
- Fresner, J., Mair, J., Schnitzer, H., Brunner, C., Gwehenberger G., y Planasch, M. (2007). *Practical experiences with reducing industrial use of water and chemicals in the galvanising industry. Quantified Eco-Efficiency*, 181-210.
- Fresner, J., Schnitzer, H., Gwehenberger, G., Planasch, M., Brunner, C., Taferner, K., y Mair, J. (2007). *Practical experiences with the implementation of the concept of zero emissions in the surface treatment industry in Austria. Journal of Cleaner Production*, 15(13-14), 1228-1239.
- Frías, C., y Pérez, O. (1998). *Recuperación de ácidos y metales en baños agotados del decapado de aceros inoxidable*. *Revista de Metalurgia*, 34(Extra), 427-431.
- García, H. (2014). *Caracterización y propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la industria de galvanizado de lámina por inmersión en caliente (Tesis de maestría)*. Universidad de San Carlos, Guatemala, 1-63.
- García, J. (1997). *Tratamiento de aguas residuales en la industria galvánica (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1-180.
- Gómez, N. (2013). *Remoción de materia orgánica por medio de coagulación y floculación. Journal of Chemical Information and Modeling (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 1-88.
- González, M., González, E., Aguirre, P., Corsano, G. (2004). *Integración Óptima en el Sistema de Reciclado de Aguas en Procesos Papeleros. Información tecnológica*, 15(3), 71-74.
- González, Y., Pires, A., y Zita, I. (2015). *Propuesta de mejora ambiental en el proyecto de una Planta de Producción de Acero Galvanizado en Angola*. *Tecnología Química*, 35(2), 234-242.
- Guelli, S., Fonseca, M., Da Silva, A., y Ulson De Souza, A. (2011). *Water reuse and wastewater minimization in chemical industries using differentiated*

- regeneration of contaminants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(12), 7428-7436.
- Hu, N., Feng, X., y Deng, C. (2011). *Optimal design of multiple-contaminant regeneration reuse water networks with process decomposition*. *Chemical Engineering Journal*, 173(1), 80-91.
- IHOBE S.A. Sociedad Pública de Gestión Ambiental (2000). *Galvanizado de Piezas. Libro Blanco para la Minimización de Residuos y Emisiones en el Sector del Galvanizado en Caliente*. Gobierno Vasco, 1-64.
- INEN, N. T. E. N. 2169: 2013. (2013). *Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras. Primera edición. Primera revisión*, 1-21.
- INEN, N. T. E. N. 2176: 2013. (2013). *Agua. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas de Muestreo. Primera edición. Primera revisión*, 1-10.
- IZA. International Zinc Association. (2010). *Zinc un material sostenible*, 1-24.
- Jover, M. (2015). *Estudio sobre los rendimientos de las decantaciones con aguas residuales con diferentes concentraciones de contaminación (Tesis doctoral)*. Universidad de Alicante, Alicante, 1-340.
- Khezri, S. M., Lotfi, F., Tabibian, S., y Erfani, Z. (2010). *Application of water pinch technology for water and wastewater minimization in aluminum anodizing industries*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7(2), 281-290.
- Klishchenko, R., Chebotareva, R., y Goncharuk, V. (2010). *Electromigration purification of galvanic sludge of copper ions*. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 32(4), 206-211.
- Kong, G., y White, R. (2010). *Toward cleaner production of hot dip galvanizing industry in China*. *Journal of Cleaner Production*, 18(10-11), 1092-1099.
- Kuo, W., y Smith, R. (1998). *Designing for the interactions between Water-Use and Effluent Treatment*. *Chemical Engineering Research and Design*, 76(3), 287-301.
- Kurniawan, T., Chan, G., Lo, W., y Babel, S. (2006). *Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals*. *Chemical Engineering Journal*, 118(1-2), 83-98.
- Labanda, J., y Llorens, J. (2008). *Wool scouring waste treatment by a combination of coagulation–flocculation process and membrane separation*

- technology. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(7), 1061-1068.
- Lapeña, M., y Rigola, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales (Vol. 27)*. Barcelona, España: Ed. Marcombo, 1-157.
- Levitskii, I., Pavlyukevich, Y., Bogdan, E., y Kichkailo, O. (2013). *Production of keramzit gravel using galvanic sludge*. *Glass and Ceramics*, 70(7-8), 255-259.
- Levitskii, I., y Poznyak, A. (2015). *Thermophysical characteristics of furnace tiles obtained using galvanic production wastes*. *Glass and Ceramics*, 72(3), 130-134.
- Lobato, N., Villegas, E., y Mansur, M. (2015). *Management of solid wastes from steelmaking and galvanizing processes: A brief review*. *Resources, Conservation and Recycling*, 102, 49-57.
- Lorber, K. (2007). *Gestión de residuos en la industria de curtido. Producción limpia en la industria de curtiembre*, 341-357.
- Lorenzo, Y., y Obaya, M. C. (2005). *La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 35-48.
- Lum, K., Stevens, G., y Kentish, S. (2014). *Development of a process for the recovery of zinc sulphate from hot-dip galvanizing spent pickling liquor via two solvent extraction steps*. *Hydrometallurgy*, 142, 108-115.
- Mann, J., Liu, Y. (1999). *Industrial water reuse and wastewater minimization. USA, New York: Ed. McGraw Hill, 1999*.
- Mariano, C., Alcocer, V., y Morales, E. (2005). *Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA Título Diseño de sistemas hidráulicos bajo criterios de optimización de puntos de pliegue y múltiples criterios. Ingeniería Hidráulica en México*, 20(3), 31-42.
- Mariano-Romero, C., Alcocer-Yamanaka, V., y Morales, E. (2005). *Multiobjective water pinch analysis of the Cuernavaca city water distribution network. Lecture Notes in Computer Science*, 3410(3), 870-884.
- Marín Galvín, R. (2013). *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas: teoría, práctica y problemas resueltos*. Madrid, España: Ed. Díaz de Santos, 1-364.
- Martínez, J., Silva, A., Orta, T. (1995). *Estudio de efluentes de residuos peligrosos para recuperación. (INE) Sedesol. Instituto de Ingeniería, UNAM*.

- Mazur, L., Pozdniakova, T., Mayer, D., Boaventura, R., y Vilar, V. (2016). *Design of a fixed-bed ion-exchange process for the treatment of rinse waters generated in the galvanization process using Laminaria hyperborea as natural cation exchanger. Water Research, 90, 354-368.*
- Mehrdadi, N., Bidhendi, G. N., y Mohammadnejad, S. (2009). *An Overview on Different Water Pinch Methods for Industrial Water and Wastewater Minimization. Environmental Sciences, 6(4), 29-42.*
- Melcalf, F., y Eddy, Y. (1995). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización. (Tercera). Madrid, España: Ed. McGraw Hill, 1-1505.*
- Méndez, J., Ramírez, C., Gutiérrez, A., García, F. (2009). *Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10(1), 29-44.*
- Miranda, P. (2011). *Precipitación química convencional: remoción simultánea de cromo total y plomo de un agua residual proveniente de una industria de galvanizado, en Bogotá, Colombia. Investigación, Biodiversidad y Desarrollo, 30(2), 147-153.*
- Mohammadnejad, S., Ataei, A., Bidhendi, G., Mehrdadi, N., Ebadati, F., y Lotfi, F. (2012). *Water pinch analysis for water and wastewater minimization in Tehran oil refinery considering three contaminants. Environmental Monitoring and Assessment, 184(5), 2709-2728.*
- Mohammadnejad, S., Bidhendi, G., y Mehrdadi, N. (2011). *Water pinch analysis in oil refinery using regeneration reuse and recycling consideration. Desalination, 265(1-3), 255-265.*
- Morales, N., y Acosta, G. (2010). *Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 20(201), 33-44.*
- Morante, G. (2002). *Electrocoagulación de Aguas Residuales. Journal of Chemical Information and Modeling, 53(2), 484-487.*
- Moya, F. (2013). *Evaluación y alternativas de tratamiento de la planta de residuales del taller galvánico de la EMI « Ernesto Che Guevara » (Tesis de Diplomado). Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, 1-80.*
- Muddasani, S., Lagnese, K., Banerjee, K., y Robinson, C. (2015). *Reducción de cloruros en aguas de mina. Canteras y explotaciones, (583), 28-38.*

- Muñoz, A. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca de Soto, 1-286.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J., y Güereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales: Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y IDRC Canadá. ISBN, 978-607.
- Oliver, P., Rodríguez, R., y Udaquiola, S. (2008). *Water use optimization in batch process industries. Part 1: design of the water network*. *Journal of Cleaner Production*, 16(12), 1275-1286.
- Ozdemir, O., y Piskin, S. (2012). *Characterization and environment risk assessment of galvanic sludge*. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 34(4), 1032-1036.
- Pellón, A., Benítez, F., Frades, J., García, L., Cerpa, A., y Alguacil, F. J. (2003). *Empleo de microalga *scenedesmus obliquus* en la eliminación de cromo presente en aguas residuales galvánicas*. *Revista de Metalurgia*, 39(1), 9-16.
- Pitty, A. (2001). *Incentivos económicos ambientales para el desarrollo de la producción más limpia y la adecuación de las empresas hacia procesos productivos menos contaminantes*, 1-75.
- Pokorný, P., Tej, P., Kouřil, M. (2017). *Evaluation of the impact of corrosion of hot-dip galvanized reinforcement on bond strength with concrete—A review*. *Construction and Building Materials*, 132, 271-289.
- Prakash, R., y Shenoy, U. (2005). *Targeting and design of water networks for fixed flowrate and fixed contaminant load operations*. *Chemical Engineering Science*, 60(1), 255-268.
- Prakotpol, D., y Srinophakun, T. (2004). *GAPinch: Genetic algorithm toolbox for water pinch technology*. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(2), 203-217.
- Priya, G., y Bandyopadhyay, S. (2017). *Multiple objectives Pinch Analysis*. *Resources, Conservation and Recycling*, 119(30), 128-141.
- PRO Ecuador. Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones. (2013). *Perfil sectorial de metalmecánica*, 1-17
- Ramalho, R. (1990). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona, España: Ed. Reverté, 1-707.

- Rašković, P. (2010). *Water pinch technology for designing wastewater reduction and water conservation systems. Working paper, Faculty of Technology Engineering, University of Nis, Serbia y Montenegro, 1-26.*
- Relvas, S., Matos, H., Fernandes, M., Castro, P., y Nunes, C. (2008). *AquoMin: A software tool for Mass-Exchange Networks targeting and design. Computers and Chemical Engineering, 32(6), 1085-1105.*
- Ríos, J., Posada, J., y Uribe, J. F. (2011). *Potencial De Recirculación De Aguas Residuales Industriales. Investigaciones Aplicadas, 5(2), 59-72.*
- Rivela, B., Bornhardt, C., Lorber, K., Vidal, G., y Méndez, R. (2004). *Caracterización ambiental de una planta de curtidos, 1, 79-94.*
- Rodríguez, J. (2011). *Tratamiento anaerobio de aguas residuales. Universidad el Valle, 1-15.*
- Rojas, R. (2002). *Sistemas de tratamiento de aguas residuales. Curso internacional «Gestion integral de tratamiento de aguas residuales» (2002: Brasil). Curso Internacional. Brasil: Cepis, 19, 1-18.*
- Rolén, A. (2015). *Water Pinch Analysis of a Lignocellulosic Ethanol Production Process (Tesis de maestría). Chalmers University of Technology, Göteborg, 1-63.*
- Romero, K. (2009). *Contaminación por Metales Pesados. Revista Científica Ciencia Médica, 12(1), 45-46.*
- Sanchis, M. (2010). *Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción, evolución de materiales y modelación del proceso (Tesis Doctoral). Universidad de Valencia, Valencia, 1-309.*
- Savelski, M., y Bagajewicz, M. (2000). *On the optimality conditions of water utilization systems in process plants with single contaminants. Chemical Engineering Science, 55(21), 5035-5048.*
- Silva, T., Campos, E., y Olgún, M. (2000). *Remocion de niquel, cadmio y zinc de agua, utilizando Clinoptilita Heulandita. Todo Sobre Los Metales, 7, 9.*
- Soto, M., Méndez, R., y Lema, J. M. (1990). *Efluentes residuales en la industria de procesado de productos marinos: caracterización, gestión de efluentes y alternativas de tratamiento. Ingeniería química, 22(255), 203-9.*
- Sotto, A. (2008). *Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos*

- fenólicos y ácidos carboxílicos (Tesis Doctoral). Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, 1-237.
- Stocks, C., Wood, J., y Guy, S. (2005). *Minimisation and recycling of spent acid wastes from galvanizing plants. Resources, Conservation and Recycling*, 44(2), 153-166.
- Sun Kou, M. D. R. (2000). *Procesos para el tratamiento de las aguas residuales en plantas galvánicas y metalúrgicas*, 195-201.
- Tahir, S., y Rauf, N. (2004). *Removal of Fe (II) from the wastewater of a galvanized pipe manufacturing industry by adsorption onto bentonite clay. Journal of Environmental Management*, 73(4), 285-292.
- Tejada, C., Villabona, Á. y Ruiz, V. (2012). *Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión. Ingenium*, 6(14), 11-21.
- Thevendiraraj, S., Klemeš, J., Paz, D., Aso, G., y Cardenas, G. (2003). *Water and wastewater minimisation study of a citrus plant. Resources, Conservation and Recycling*, 37(3), 227-250.
- Tovar, C. T., Ortiz, Á., Rangel, V. (2012). *Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión. Ingenium*, 6(14), 11-21.
- Trapote, M., y Martínez, B. (2012). *Regeneración y reutilización de las aguas residuales. Técnica Industrial*, 298, 32-44.
- Uche, J. (2013). *La energía en el agua. Zaragoza, España: Ed. Universidad de Zaragoza*, 1-235.
- Villamar, C. A., Vera, L., López, D., y Vidal, G. (2014). *Estrategias para evaluar el tipo de tratamiento y la aplicación de purines porcinos a partir de su caracterización físico-química, SBERA*, 1-4.
- Wan Alwi, S., y Manan, Z. (2013). *Water Pinch Analysis for Water Management and Minimisation: An Introduction. Handbook of Process Integration (PI): Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emissions*, 353-382.
- Wang, Y., y Smith, R. (1994). *Wastewater minimisation. Chemical Engineering Science*, 49(7), 981-1006.
- Yang, Y., Lou, H., y Huang, Y. (2000). *Synthesis of an optimal wastewater reuse network. Waste Management*, 20(4), 311-319.

Zagal, E., y Zadzwaka, R. (2007). *Protocolo de Métodos de Análisis para suelos y lodos*. Universidad de Concepción, Servicio Agrícola y Ganadero: Santiago, Chile, 1-103.

ANEXOS

ANEXO No. 1

**VISITA TÉCNICA PARA LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL PROCESO DE
GALVANIZACIÓN: PLANTA NOVACERO S.A.**

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL PROCESO PRODUCTIVO

Fecha de la visita: 02 junio de 2017

FASE : DESENGRASE			
Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	23	m ³
	Tipo de material	Acero recubierto de fibra de vidrio	
	Caudal	-	m ³ /s
Reactivos	Número	1	-
	Tipo	Alcalino	-
	Nombre	Desengrasante Axa 747	-
	Cantidad	1 kg por cada 1 m ³ de agua	-
	Concentración		
	Tiempo de residencia	1 mes	-
	Condiciones de operación	pH	14
Temperatura		66-70	°C
Fecha de ingreso (agua + Rx)		Nivelado diario	-
Fecha de cambio (agua + Rx)		No existe descarga	-
Observaciones: Eliminación del lodo cada 3 meses			

FASE : ENJUAGUE			
Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	23	m ³
	Tipo de material	Acero recubierto de fibra de vidrio	
	Caudal	-	m ³ /s
Reactivos	Número	1	-
	Tipo	Neutro	-
	Nombre	Agua fresca	-
	Cantidad	23	m ³
	Concentración	-	-
	Tiempo de residencia	Baño corrido	-
	Condiciones de operación	pH	7-8
Temperatura		Ambiente	°C
Fecha de ingreso (agua + Rx)		Nivelado diario	-
Fecha de cambio (agua + Rx)		Nivelado diario	-
Observaciones: Eliminación del lodo cada 3 meses.			

FASE : DECAPADO 1, 2 y 3

Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	23	m ³
	Tipo de material	Acero recubierto de fibra de vidrio	-
	Caudal	-	m ³ /s
Reactivos	Número	3	-
	Tipo	Ácido	-
	Nombre	Ácido clorhídrico (HCl) Inhibidor IROSAVE Antivapor	-
	Cantidad	11.4 m ³ de agua + 11.4 m ³ de HCl + 78 kg inhibidor + 150 kg antivapor	-
	Concentración	HCl 18%	p/p
	Tiempo de residencia	1.5	mes
Condiciones de operación	pH	0	-
	Temperatura	Ambiente	°C
	Fecha de ingreso (agua + Rx)	2 meses	-
	Fecha de cambio (agua + Rx)		-
	Observaciones: Determinación de ácido libre y hierro en el baño ácido		

FASE : ENJUAGUE 1

Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	23	m ³
	Tipo de material	Acero recubierto de fibra de vidrio	-
	Caudal	-	m ³ /s
Reactivos	Número	1	-
	Tipo	Ácido	-
	Nombre	Agua fresca	-
	Cantidad	23	m ³
	Concentración	-	-
	Tiempo de residencia	Baño corrido	-
Condiciones de operación	pH	3-5	-
	Temperatura	Ambiente	-
	Fecha de ingreso (agua + Rx)	Nivelado diario	mV
	Fecha de cambio (agua + Rx)	Nivelado diario	-
Observaciones: No presenta generación de lodos			

FASE : ENJUAGUE 2

Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	23	m ³
	Tipo de material	Acero recubierto de fibra de vidrio	
	Caudal	-	m ³ /s
Reactivos	Número	1	-
	Tipo	Ácido	-
	Nombre	Agua fresca	-
	Cantidad	23	m ³
	Concentración	-	-
	Tiempo de residencia	Baño corrido	-
	pH	3-5	-
Condiciones de operación	Temperatura	Ambiente	
	Fecha de ingreso (agua + Rx)	Nivelado diario	mV
	Fecha de cambio (agua + Rx)	Nivelado diario	
	Observaciones: No presenta generación de lodos		

FASE : FLUXADO

Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	23	m ³
	Tipo de material	Acero recubierto de fibra de vidrio	
	Caudal	-	m ³ /s
Reactivos	Número	4	-
	Tipo		-
	Nombre	Sal Flux Agua oxigenada Amoniaco líquido Aditivo FinFlux	-
	Cantidad	950 kg Sal Flux 8 L amoniaco 4 L agua oxigenada 210 kg FinFlux	-
	Concentración	50 % agua oxigenada y amoniaco	v/v
	Tiempo de residencia	Sal Flux 2 meses	-
	pH	5	-
Condiciones de operación	Temperatura	50-60	°C
	Fecha de ingreso (agua + Rx)	Regeneración (6 meses)	
	Fecha de cambio (agua + Rx)	No existe descarga	
	Observaciones: Regeneración diaria filtro de prensa		

FASE : BAÑO DE ZINC

Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	Mayor a 23	m ³
	Tipo de material	Acero recubierto de fibra de vidrio	-
	Caudal	-	m ³ /s
Reactivos	Número	-	-
	Tipo	-	-
	Nombre	Zinc	-
	Cantidad	-	-
	Concentración	99.9 %	-
	Fecha ingreso	-	-
	Fecha salida	-	-
Condiciones de operación	pH	-	-
	Temperatura	450	°C
	Fecha de ingreso (agua + Rx)	-	-
	Fecha de cambio (agua + Rx)	-	-
Observaciones: Extracción mensual de escorias y matas de Zn (3-4 ton)			

FASE : ENFRIAMIENTO

Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	23	m ³
	Tipo de material	Acero recubierto de fibra de vidrio	-
	Caudal	-	m ³ /s
Reactivos	Número	1	-
	Tipo	Neutro	-
	Nombre	Agua fresca	-
	Cantidad	23	m ³
	Concentración	-	-
	Tiempo de residencia	Baño corrido	-
Condiciones de operación	pH	7	-
	Temperatura	30-60	°C
	Fecha de ingreso (agua + Rx)	Nivelado diario	-
	Fecha de cambio (agua + Rx)	Nivelado diario	-
Observaciones: Eliminación del lodo cada 3 meses			

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA PT-RILes

Fecha visita: 02 junio de 2017

OPERACIÓN UNITARIA : TANQUE DE HOMOGENIZACIÓN

Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	200	m ³
	Tipo de material	Concreto	-
	Caudal	4-5	m ³ /s
Reactivos	Número	-	-
	Tipo	-	-
	Nombre	-	-
	Cantidad	-	-
	Concentración	-	-
	Tiempo de residencia	-	-
Condiciones de operación	pH	6	-
	Temperatura	23	°C
	Fecha de ingreso (agua + Rx)	-	-
	Fecha de cambio (agua + Rx)	-	-
Observaciones:			

OPERACIÓN UNITARIA : TANQUE DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN

Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	18	m ³
	Tipo de material	Acero	-
	Caudal	-	m ³ /s
Reactivos	Número	3	-
	Tipo	Alcalino	-
	Nombre	Hidróxido de sodio Lechada de cal Polímero catiónico	-
	Cantidad	-	-
	Concentración	100 (NaOH), 80 (Polímero), 60 (Lechada de cal)	ppm
	Tiempo de residencia	1	hora
Condiciones de operación	pH	12	-
	Temperatura	Ambiente	°C
	Fecha de ingreso (agua + Rx)	-	-
	Fecha de cambio (agua + Rx)	-	-
Observaciones:			

OPERACIÓN UNITARIA : FILTRACIÓN (GEOTUBO)

Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	6	m ³
	Tipo de material	Membrana y filtro (grava)	-
	Caudal	-	m ³ /s
Reactivos	Número	-	-
	Tipo	-	-
	Nombre	-	-
	Cantidad	-	-
	Concentración	-	-
	Tiempo de residencia	Minutos	-
Condiciones de operación	pH	12	-
	Temperatura	Ambiente	°C
	Fecha de ingreso (agua + Rx)		
	Fecha de cambio (agua + Rx)		
Observaciones:			

OPERACIÓN UNITARIA : TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Ítem	Parámetro	Valor/Detalle	Unidad
Tamaño Cuba	Volumen	20	m ³
	Tipo de material	Acero	-
	Caudal	-	m ³ /s
Reactivos	Número	-	-
	Tipo	Ácido	-
	Nombre	Ácido clorhídrico puro	-
	Cantidad		-
	Concentración	32 %	p/p
	Tiempo de residencia	Minutos	-
Condiciones de operación	pH	7-8	-
	Temperatura	Ambiente	°C
	Fecha de ingreso (agua + Rx)		
	Fecha de cambio (agua + Rx)		
Observaciones:			

ANEXO No. 2

PROTOCOLO DE MUESTREO DE AGUA RESIDUAL CASO: NOVACERO S.A.

CRITERIO PARA EL MUESTREO DE LOS RESIDUOS LÍQUIDOS GALVÁNICOS

Tipo de muestreo: Manual

Los puntos de control seleccionados se ubican en zonas de fácil acceso (canales abiertos) que permiten la introducción de envases de toma de muestras de forma manual.

Medición de caudales: Manual (método volumétrico)

La medición de caudal por este método se realiza de forma manual y requiere de un cronómetro y un recipiente graduado. El procedimiento consistirá en recolectar un volumen de muestra y medir el tiempo transcurrido entre el comienzo de la recolección y el retiro del recipiente. Para la medición del caudal se tomará *1 muestra cada dos horas en un periodo de monitoreo de 50 horas en una semana (10 horas diarias)*.

Tipo de muestras: Compuestas de volumen constante/ tiempo proporcional a volúmenes descargados.

El agua a ser muestreada presenta flujo continuo y debido a que las características de las aguas residuales no son constantes a lo largo del día (renovación parcial del volumen) en cada cuba de lavado y la descarga discontinua de los residuos líquidos que llegan a la PT-RILes, es necesario determinar la concentración promedio de los parámetros a ser analizados a través de una muestra compuesta. No obstante, cada muestra puntual se tomará en el punto superior, medio y final de cada tanque, para evitar el asentamiento de sólidos, de manera que la muestra esté homogeneizada.

El método seleccionado (volumen proporcional al flujo) para la toma de la muestra continua, se eligió considerando que el mismo es preferido cuando se muestrea manualmente y cuando no se conoce el comportamiento del caudal.

La muestra compuesta se formará por alícuotas de muestras puntuales, tomando *1 muestra cada 0,5 m de profundidad (0.5 m, 1 m 1.5 m) en un intervalo total de 8 horas (jornada inicial, media y final)*, con un total de 2 repeticiones en diferentes semanas.

Formación de muestras compuestas: Manual de las muestras puntuales, con volúmenes de muestra proporcionales al caudal instantáneo medido en cada muestra puntual.

PRESERVACIÓN, TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Técnica de preservación: refrigeración y preservantes (ver Tabla A2.1).

Refrigeración Laboratorio: 4°C

Refrigeración Instalaciones de la empresa: 4 ° C

Para la refrigeración de las muestras, se conutizará el simple enfriamiento (en baño de hielo a temperaturas entre 2°C y 5°C) y serán almacenadas en un lugar oscuro, hasta su traslado al laboratorio.

La Tabla A2.1 presenta los parámetros a evaluar en cada muestra así como los tipos de recipientes, volúmenes extraídos, en tiempo máximo antes del muestreo y las técnicas de preservación que se seguirán para cada parámetro.

Tabla A2.1 Técnicas generales para la conservación de muestras - análisis físico-químico

Nº	Parámetro	Unidad	Tipo de recipiente	Volumen (ml)	Técnica de preservación	Tiempo máximo antes del análisis	Comentarios
1	pH	-	P o V	100	Se enfría a entre 1 °C y 5 °C.	6 h	La prueba debe llevarse a cabo tan pronto como sea posible y, preferentemente en el lugar de muestreo.
2	Temperatura	°C	-	-	-	Inmediato	-
3	Conductividad	µcm			Refrigeración de 2°C a 5°C		
4	Cobre	mg/L	P lavado con ácido o V lavado con ácido	100	Acidificar entre pH 1 a 2 con HNO ₃	1 mes	6 meses
5	Sólidos filtrables	mg/L	P o V				
6	Sólidos en suspensión	mg/L	P o V	500	Se enfría hasta 1 - 5 °C.	2 días	
7	Sólidos totales	mg/L	P o V	100	Se enfría hasta 1 - 5 °C.	24 h	
8	DQO	mg/L	P o V	100	Acidificar a pH 1 a 2 con H ₂ SO ₄	1 mes	6 meses
9	Amonio	mg/L					
10	Zinc	mg/L	P lavado con ácido	100	Acidificar a pH 1 a 2 con HNO ₃	1 mes	6 meses
11	Cloruros	mg/L	P o V	100		1 mes	
12	Hierro total	mg/L	P lavado con ácido	100	Acidificar a entre pH 1 a 2 con HNO ₃ .	1 mes	
13	Aceites y grasas	mg/L	V lavado con solvente	1 000	Acidificar a pH 1 a 2 con HCl o H ₂ SO ₄	1 mes	
14	Tensoactivos	mg/L	V	500	Se enfría hasta 1 - 5 °C	2 días	El vidrio no debe ser lavado con detergente.

Nota. V (vidrio), P (plástico)

Fuente: NTE INEN 2169; 2013

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS

Para realizar el análisis del conjunto de parámetros enlistados en la Tabla A2.1, se recolectarán varios envases con volúmenes predeterminados agrupados en función del tipo de envase y de la técnica de preservación.

Análisis laboratorio:

Para todos los parámetros, exceptuando el pH y temperatura se tomarán muestras compuestas para ser analizadas en el laboratorio.

Análisis en campo:

Para determinar el pH y la temperatura de los puntos de control, se tomarán muestras puntuales y se analizarán en el mismo sitio de muestreo. Debido a que la muestra compuesta de los mismos puede enmascarar el resultado de estos parámetros.

LAVADO, Y LLENADO DE RECIPIENTES

Lavado de recipientes:

- a. Los recipientes a utilizar serán lavados con el fin de minimizar la contaminación de la muestra.
- b. Los recipientes de vidrio, serán lavados con agua y detergente para retirar el polvo y los residuos del material, seguido de un enjuague con agua destilada.

Llenado del recipiente:

Una vez tomada la muestra, los frascos se llenarán completamente y serán taponados de tal forma que no exista aire sobre la muestra. A excepción de los recipientes cuyas muestras se vayan a congelar como método de conservación.

REGISTRO DE IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS

Identificación del punto de muestreo: _____
 Fecha y hora de recolección de la muestra: _____
 Origen de la muestra: _____
 Código de identificación del envase: _____
 Tipo de envase de la muestra: _____
 Método de preservación aplicado a la muestra: _____
 Tipo de muestra: Compuesta

ANEXO No. 3

PROTOCOLO DE MUESTREO DE LODOS CASO: NOVACERO S.A.

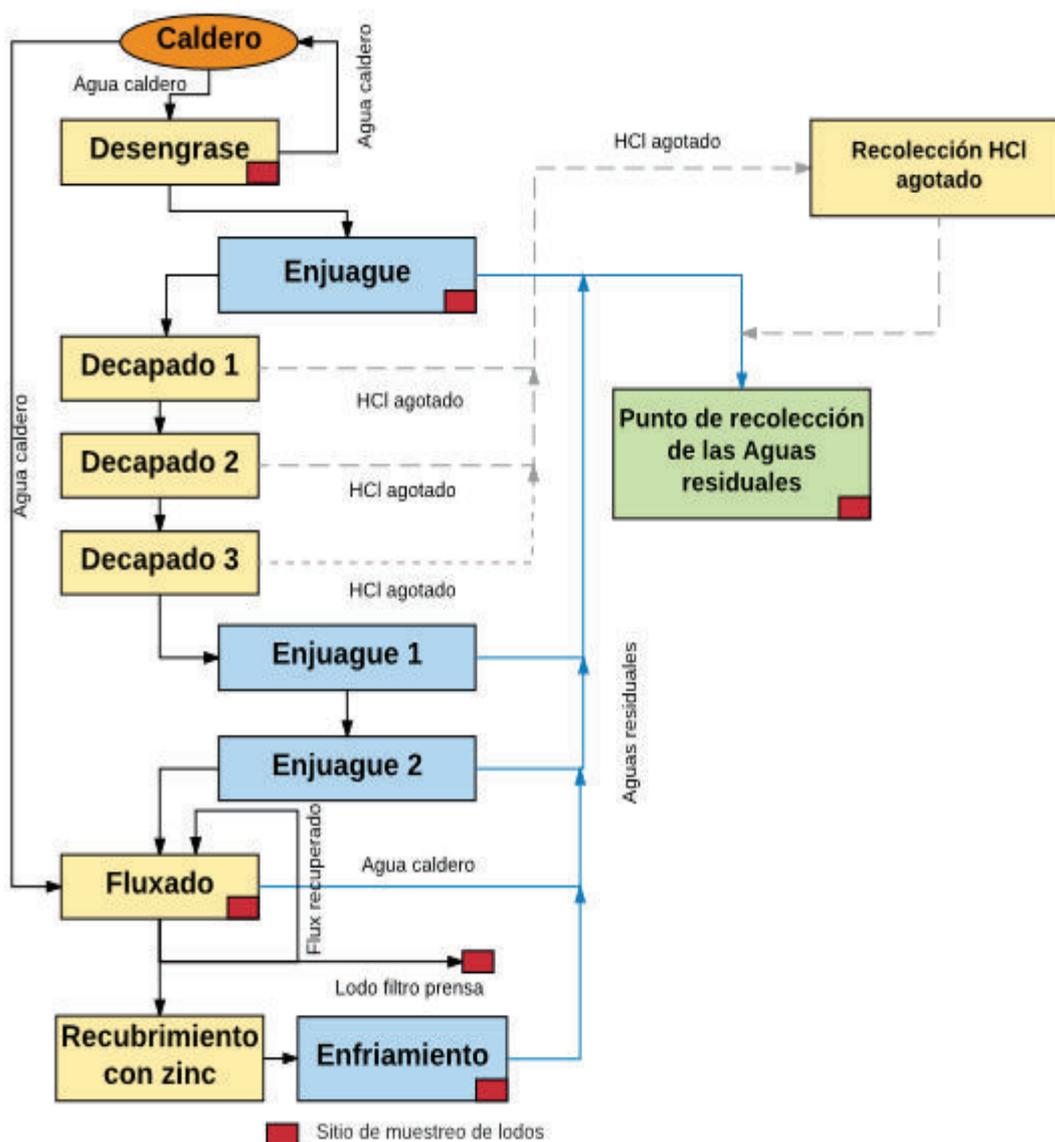
PROTOCOLO DE MUESTREO DE LODOS

SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

Los sitios de muestreo, de los lodos generados en los diferentes procesos unitarios del galvanizado, se señalan en la *Figura A3.1*. Las muestras o porciones del volumen total de lodo generado en cada sitio, se tomarán en puntos específicos seleccionados en función de que los mismos representen la calidad del lodo en la totalidad su flujo.

Las muestras a tomar contarán con fracciones sólidas/líquidas representativas, de forma que no se interfiera significativamente en los resultados analíticos; de los parámetros contaminantes asociados con metales precipitados (fracción sólida), u orgánicos disueltos (fracción líquida) objeto de estudio para evaluar la calidad del lodo generado en procesos galvánicos.

Figura A3.1 Puntos de muestreo de lodo en la línea de galvanizado



CRITERIO PARA EL MUESTREO DE LODOS GALVÁNICOS

Tipo de muestreo: Manual

Los lodos a muestrear se ubican en canales abiertos, que permiten introducir el equipo para la toma de muestras manualmente.

Tipo de muestras: Compuestas

Los puntos de control presentan el flujo de lodo ubicados en tanques, mal mezclados. Por tanto, una muestra compuesta reflejará mejor las concentraciones medias (en ubicación) que se encuentran en la corriente de flujo de lodo.

Para garantizar que la muestra represente a toda la corriente de lodo, se considerará la obtención de muestras individuales en la sección transversal del flujo de lodo. Cada muestra compuesta estará conformada por muestras puntuales, de igual volumen (200 ml), tomadas a nivel medio de profundidad, para minimizar el sesgo de la muestra causado por la estratificación de sólidos.

Adicionalmente, para muestrear lodos semisólidos (torta deshidratada), la estratificación será evitada muestreando en varios lugares del tanque. Para lo cual, se dividirá la longitud del contenedor del lodo (tanque), en 3 puntos (inicio, medio, fin) y se tomarán cantidades iguales de muestra de cada punto (*ver Figura A3.2*).

Las consideraciones específicas, para el muestreo de los tipos de lodos generados se detallan en la *Tabla A3. 2*.

Formación de muestras compuestas: Manual a partir de las muestras puntuales.

Las muestras individuales de cada punto de control, posteriormente serán completamente mezcladas, para proporcionar una muestra compuesta homogénea.

Equipo de muestreo:

Las muestras serán recogidas con una pala metálica y se dispondrán en jarras de plástico graduadas para extraer volúmenes iguales de muestra. Finalmente, serán colocadas en una bolsa plástica limpia con cierre hermético, hasta formar las muestras compuestas.

PRESERVACIÓN Y TRANSPORTE DE LAS MUESTRAS

Técnica de preservación: Refrigeración 4 °C (*ver Tabla A3.1*).

Para la refrigeración de las muestras de lodo, se utilizará la técnica de simple enfriamiento (baño de hielo) y su almacenamiento en un lugar oscuro hasta su análisis.

Transporte:

Las muestras compuestas, se trasladarán al laboratorio, en bolsas de polietileno selladas e identificadas. Y se evitará que sean expuestas al sol, o presenten alguna ruptura durante su transporte. El tiempo máximo de transporte, será de 8 horas.

Para mantener la integridad de los constituyentes del lodo, desde la toma la muestra hasta su análisis en laboratorio, la *Tabla A3.1* presenta el tiempo máximo para la conservación de sus características y método de preservación que serán observados.

Tabla A3.1 Consideraciones generales para el muestreo de lodos

N°	Parámetro	Unidad	Tipo de recipiente	Tiempo máximo recomendado de preservación antes del análisis	Técnica de preservación
1	pH	-	P o V	Inmediato	-
2	Conductividad	µcm	P o V	28 días	Enfriar a 4°C
3	Sólidos totales	mg/L	P o V	7 días	Enfriar a 4°C
4	Sólidos volátiles	mg/L	P o V	7 días	Enfriar a 4°C

Nota. V (vidrio), P (plástico)

Fuente: EPA, 2009

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS

Los análisis de los parámetros enlistados en la *Tabla A3.1* se realizarán en el Laboratorio, a excepción del pH que será determinado in situ.

LAVADO DE RECIPIENTES

Los equipos/recipientes a emplear en el muestreo de lodos, tendrán un protocolo de descontaminación para asegurar que las muestras estén libres de contaminación cruzada. Para lo cual, serán lavados con un detergente sin fósforo, enjuagado con agua corriente y luego al menos tres enjuagues con agua destilada y secado.

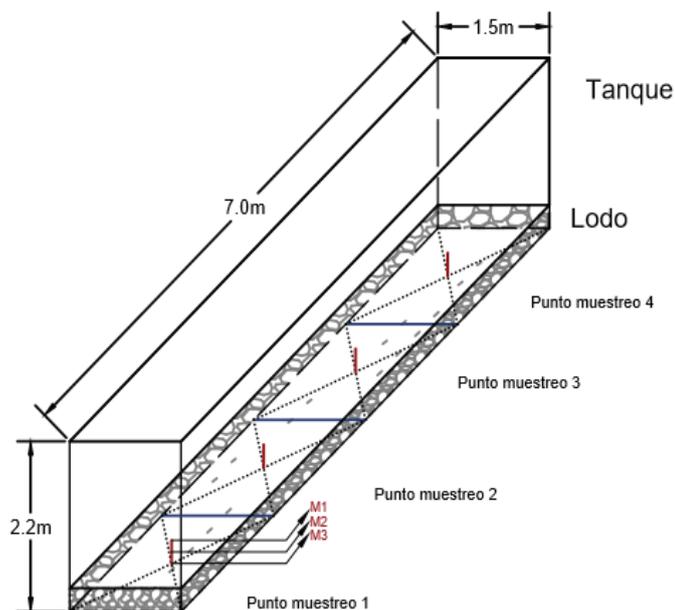
Figura A3.2 Ubicación de los puntos de muestreo individual

Tabla A3.2 Estrategia de muestreo por tipo de lodo

N°	Ubicación del lodo	Descripción	Estrategia de muestreo
1	Lodo del desengrase	Torta semideshidratada	Para las tortas deshidratadas, se combinarán cantidades iguales recogidas en diferentes lugares para obtener una muestra más representativa. Se dividirá la longitud del tanque, en 3 puntos y se tomarán 3 volúmenes de 200 ml de muestra en el punto medio del perfil transversal ($\frac{1}{2}$ de profundidad) del centro de cada tercio.
2	Lodo del enjuague del desengrase	Torta semideshidratada	Se dividirá la longitud del tanque, en 3 puntos y se tomarán 3 volúmenes de 200 ml de muestra en el punto medio del perfil transversal ($\frac{1}{2}$ de profundidad) del centro de cada tercio.
3	Lodo del flux	Lodo líquido	Se dividirá la longitud del tanque, en 3 puntos y se tomarán 3 volúmenes de 200 ml de muestra en el punto medio del perfil transversal ($\frac{1}{2}$ de profundidad) del centro de cada tercio.
4	Lodo filtro presa flux	Polvo seco	Muestreo del contenedor de almacenamiento; se seleccionarán 4 puntos dentro de la bandeja de almacenamiento, y se recogerá la misma cantidad de muestra de cada punto y se combinarán.
5	Lodo del punto de recolección	Torta deshidratada	Se dividirá al tanque, en 4 puntos y se tomarán 3 volúmenes de 200 ml de muestra en el punto medio del perfil transversal ($\frac{1}{2}$ de profundidad) del centro de cada cuarto.

ETIQUETA DE LA MUESTRA

Localización del sitio del muestreo: _____
Tipo de muestra: _____
Método de recolección: _____
Fecha de la recolección: _____
Hora de la recolección: _____
Nombre del recolector: _____
Condiciones/Comentarios: _____
Tipo de análisis a realizarse: _____
Cantidad de lodos tomados (kg): _____

ANEXO No. 4
ACTIVIDADES DE DIFUSIÓN

3º CONGRESO INTERAMERICANO DE CAMBIO CLIMÁTICO

"Resiliencia frente al Cambio Climático en Latinoamérica"
8, 9 y 10 de Mayo de 2018. Bs As. Argentina

Buenos Aires, 2 de Abril de 2018

At. Alejandra Villamar

Ref.: 3º Congreso Interamericano de Cambio Climático

De mi mayor consideración,

En mi carácter de Presidente de la Asociación Argentina de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente –AIDIS Argentina- me dirijo a Uds a fin de informarle que el trabajo "**Estrategias de segregación de corrientes de agua para su reciclaje dentro de la industria del galvanizado**", ha sido **APROBADO** para exponer en el **3º Congreso Interamericano de Cambio Climático** a celebrarse en el Palacio de las Aguas Corrientes los días 8, 9 y 10 de Mayo de 2018 en la Ciudad de Buenos Aires: <http://www.aidisar.org.ar/3ocongreso-interamericano-de-cambio-climatico/>.

Sin otro particular, aprovechamos esta oportunidad para saludarla muy cordialmente.



Ing. Juan Carlos Giménez
Presidente AIDIS Argentina

