



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“Desarrollo de modelos de optimización para la
implementación de estrategias de intercambio de créditos
de contaminantes”**

POR:

FRANCISCO LÓPEZ VILLARREAL

**TESIS PRESENTADA AL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
QUÍMICA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

CELAYA, GUANAJUATO, SEPTIEMBRE DE 2013.

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Subsecretaría de Educación Superior
Dirección General de Educación Superior Tecnológica
Instituto Tecnológico de Celaya

“2013, Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano”

Celaya, Gto., 2013-SEPTIEMBRE-23
DEPTO. DE INGENIERÍA QUÍMICA
Oficio No.242 /2013

**Asunto: Aprobación de Impresión
Tesis de DOCTORADO**

DR. RAMIRO RICO MARTÍNEZ

JEFE DE DEPARTAMENTO DE ING. QUÍMICA
PRESENTE

De acuerdo con la convocatoria hecha por esa Jefatura a su cargo, con el fin de determinar la Aprobación de Impresión del Proyecto de **DOCTORADO**, titulado:

“DESARROLLO DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE INTERCAMBIO DE CRÉDITOS DE CONTAMINANTES”

El (la) **C. FRANCISCO LÓPEZ VILLARREAL**, comunica a usted que esta Comisión Revisora de Tesis ha tenido a bien aprobar la impresión de este trabajo.

Lo anterior, para los efectos consiguientes.

Atentamente

“La Técnica por un México Mejor”

Dr. Vicente Rico Ramírez
Presidente

Dr. Juan Francisco Javier Alvarado
Secretario

Dr. Richart Vázquez Román
Vocal

Dra. Gloria María Martínez González
Vocal suplente

c.c.p. expediente

/crl*



DESARROLLO DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE INTERCAMBIO DE CRÉDITOS CONTAMINANTES

Por: Francisco López Villarreal

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de modelos de programación matemática para describir el proceso de intercambio de créditos contaminantes entre diferentes fuentes puntuales que comparten la misma cuenca hidrológica. Las formulaciones propuestas determinan los casos en los cuales las fuentes contaminantes deben comprar créditos para compensar el incumplimiento de las restricciones ambientales, o aquellos casos en los cuales la mejor solución es la implementación de tecnología para vender créditos a otras fuentes. Las formulaciones consideran la minimización de los costos asociados a la implementación de tecnología para satisfacer las restricciones ambientales impuestas. El primer desarrollo contempla la incorporación de un sistema de penalizaciones económicas para las fuentes puntuales que, aún con el intercambio de créditos, no pueden cumplir las restricciones ambientales. El segundo modelo puede predecir el comportamiento de la cuenca hidrológica impactada por las descargas contaminadas a través de un análisis de flujo de materia, el cual permite cuantificar el impacto ambiental de tal modo que las corrientes descargadas tengan características que aseguren la sostenibilidad de la misma. Para evaluar los modelos propuestos se desarrollaron dos casos de estudio que muestran las ventajas de las formulaciones propuestas. Los modelos propuestos determinan la configuración óptima de las unidades de tratamiento, y sus funciones objetivo consisten en la minimización de los costos asociados a la instalación de tecnologías requeridas para tratamiento de efluentes. El intercambio de créditos contaminantes provee una alternativa para que las fuentes contaminantes puedan satisfacer las restricciones ambientales. La metodología propuesta no sustituye las regulaciones ambientales, pero provee un mecanismo para que las fuentes reguladas cumplan los estándares de calidad ambiental establecidos a un costo menor que aquél relacionado con las políticas de comando y control.

Dirigido por: Dr. Vicente Rico Ramírez

Dedicatoria

A Mayra A. Pantoja Castro

A mis padres Francisco López Carrasco
y Enid G. Villarreal Calva

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincera gratitud al Dr. Vicente Rico Ramírez, por todas las enseñanzas, por su valioso tiempo, apoyo, motivación, paciencia y los todos los consejos que me dio en el momento justo, por su guía, y por ayudarme a crecer en todos los aspectos.

Me gustaría también agradecer a los miembros del comité revisor. Al Dr. Juan Francisco Javier Alvarado, por motivarme desde el inicio de mi estancia en Celaya, estoy seguro que de no haberlo conocido mi vida tendría otro rumbo.

A la Dra. Gloria María Martínez González y al Dr. Richart Vázquez Román, por las observaciones que enriquecieron este trabajo, por su valioso tiempo y aún más valiosos comentarios.

Al Dr. Mahmoud M. El-Halwagi, por recibirme en su grupo de investigación en la Universidad de Texas A&M y por sus aportaciones a este proyecto.

Al Dr. José María Ponce Ortega y a Luis Fernando Lira Barragán por sus contribuciones en este trabajo.

A Mayra A. Pantoja, por toda tu paciencia y amor, por tu tiempo, apoyo y todo lo que haces y todos los momentos que hemos pasado y que han hecho que pueda concluir esta etapa de mi vida. Sin duda has sido importante en la realización de este proyecto y en mi vida.

A mis padres Francisco López Carrasco y Enid G. Villarreal Calva, por todo su apoyo y cariño siempre, en especial en los momentos más difíciles. Por darme las bases para poder

desarrollarme, y haber hecho de mí lo que hoy soy. Espero poder corresponder todos sus sacrificios.

A mis hermanas, Mayte y Celeste y mi cuñado Adolfo por todo su apoyo.

A mis sobrinos Mayte y Adolfo, porque me hacen querer seguir adelante recordándome que existe la inocencia y enseñarme que hay alguien por quien velar en el futuro.

A toda mi familia, en especial a mis tíos José Luis, María del Rosario, Dorothy, Morris, Daniel, Sergio y Gonzalo. A mis primas Dorothy, Iris, y primos Pepe, Irving y Aldrich por su apoyo en las diversas etapas de este proceso.

A todas aquellas personas que siempre han formado parte de mi vida y me han apoyado y ayudado a ser lo que ahora soy: al profesor Rogelio Vergara García, que me enseñó la importancia de la Ingeniería Química en la vida diaria, a la Maestra María de la Luz Romano Sánchez. A mis compañeros de Ciencias Básicas, David Olvera, Carlos Hernández, Isaac Sánchez, Claudia Caballero.

Quisiera agradecer de manera muy especial al Ingeniero Alejandro Monroy, sin sus enseñanzas mucho de esto no hubiera sido posible, y por su ayuda en esta nueva etapa de mi vida.

A mis amigos que considero una segunda familia, que ha hecho que la vida sea más fácil en su compañía. Por todas las pláticas y momentos agradables que pasé con ustedes: Nancy del Pilar Medina, Micael Bravo, Antioco López, Carolina Conde, Salvador Tututi, mi estimadísimo amigo Fabricio Nápoles y su familia Daisy Ivette y Victoria, Carmen Sandate,

Dr. Armando Ramírez Serrano, Fernando Israel Gómez, Julio de Lira y su apreciable familia Noemi, Dulce y Abril, a Adriana Guzmán, Noé Reyes y Miguel Montalvo.

Finalmente, quiero agradecer a todos los profesores y al personal del departamento de Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Celaya, por su apoyo y buen trato, especialmente a Claudia Rodríguez Lule por su amabilidad en todo momento.

A CONACyT por el apoyo financiero para llevar a cabo este proyecto.

Contenido

Resumen.....	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos.....	iii
Contenido.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tablas	xi
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Intercambio de Créditos Contaminantes	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Descripción del Trabajo.....	6
CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS DEL INTERCAMBIO DE CRÉDITOS CONTAMINANTES	7
2.1 Conceptos Básicos.....	8
2.2 Modelo de Referencia para el Intercambio de Créditos de Contaminantes.....	10
2.3 Limitaciones del Modelo de Referencia.....	13
CAPÍTULO 3. PRINCIPIOS DEL ANÁLISIS DE FLUJO DE MATERIA	15
3.1 Introducción	16
3.2 Desarrollo del Modelo de MFA	16
CAPITULO 4. MODELOS DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA EL INTERCAMBIO DE CRÉDITOS CONTAMINANTES	24
4.1 Formulación del Modelo Base.....	25

4.2	Extensión del Alcance del Modelo Base.....	32
	4.2.1 Puntos Localizados con Alta Concentración de Contaminante	33
4.2.2	Penalizaciones Económicas.....	35
	4.2.2.1 Penalizaciones Económicas: Alternativa 1.....	35
	4.2.2.2 Penalizaciones Económicas: Alternativa 2	37
4.2.3	Objetivo y Limitaciones del Modelo.....	39
 CAPÍTULO 5. INCORPORACIÓN DEL ANÁLISIS DE FLUJO DE MATERIA.....		41
5.1	Introducción	42
5.2	Formulación del Modelo	45
	5.2.1 Función Objetivo	46
	5.2.2 Análisis de Flujo de Materia (MFA).....	46
	5.2.2.1 Balances de Masa para cada Tramo	46
	5.2.2.2 Balance de Contaminante para cada Tramo.....	47
	5.2.2.3 Balance de Masa para los Tributarios.....	47
	5.2.2.4 Balance por Contaminante para los Tributarios	48
	5.2.2.5 Términos para las Reacciones Químicas.....	48
	5.2.2.6 Descargas Agrícolas y Usos del Agua.....	49
	5.2.3 Modelo para la Red de Tecnologías de Tratamiento	49
	5.2.4 Intercambio de Créditos de Contaminante.....	53
	5.2.4.1 Mercado para el Intercambio de Créditos Contaminantes	54
 CAPÍTULO 6. CASOS DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		58
6.1	Caso de Estudio 1. Modelo Base.....	59
	6.1.1 Reducción de Contaminantes.....	59
	6.1.2 Parámetros para el Intercambio de Créditos	59
	6.1.3 Resultados y Análisis	61
6.2	Caso de Estudio 2. Modelo que incorpora el MFA.	75
 CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		85
7.1	Conclusiones	86

7.1.1 Conclusiones particulares del Caso de Estudio 1	88
7.1.2 Conclusiones particulares del Caso de Estudio 2	89
7.2 Trabajos Futuros	90
REFERENCIAS.....	92
APÉNDICE A.....	98
A.1 Nomenclatura Capítulo 4.....	99
A.2 Nomenclatura Capítulo 5.....	102

Lista de Figuras

		Página
Figura 2.1	Intercambio de créditos contaminantes entre fuentes puntuales	10
Figura 3.1	Representación de un tributario y sus alrededores.....	17
Figura 3.2	Representación de un tramo y sus alrededores.....	18
Figura 3.3	Balance de materia por componente en un elemento de volumen de un tramo.....	19
Figura 5.1	Descripción de una cuenca hidrológica y representación de la estrategia de intercambio de créditos de contaminante entre fuentes puntuales.....	44
Figura 5.2	Red de tecnologías de tratamiento.....	50
Figura 6.1	Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.35$	65
Figura 6.2	Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.30$	65
Figura 6.3	Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.25$	66
Figura 6.4	Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.20$	66
Figura 6.5	Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.10$	67

Figura 6.6	Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.05$	67
Figura 6.7	Configuración óptima de la solución de implementación de tecnología.....	70
Figura 6.8	Representación esquemática del caso de estudio 2.....	76
Figura 6.9	Función objetivo contra masa total de contaminante liberada por todas las fuentes puntuales después de la implementación de tecnología para diferentes valores de LC	79

Lista de Tablas

	Página
Tabla 6.1 Datos para cada fuente i . Caso de Estudio 1.....	60
Tabla 6.2 Datos para las diferentes tecnologías de tratamiento. Caso de Estudio 1.....	61
Tabla 6.3 Resultados para el Caso de Estudio 1.....	62
Tabla 6.4 Resultados para descarga anual de mercurio. Caso de Estudio 1.....	63
Tabla 6.5 Resultados de las configuraciones óptimas de implementación de tecnología Caso de Estudio 1.....	71
Tabla 6.6 Intercambio de créditos óptimo. Caso de Estudio 1.....	72
Tabla 6.7 Descarga volumétrica de las fuentes puntuales en los tributarios (m^3/s). Caso de Estudio 2.....	77
Tabla 6.8 Concentración de las descargas de las Fuentes puntuales en los tributarios (ppm). Caso de Estudio 2.....	77
Tabla 6.9 Datos para descarga volumétrica (m^3/s) y concentración (ppm) de las fuentes puntuales en los tramos. Caso de Estudio 2.....	78
Tabla 6.10 Datos para las diferentes tecnologías de tratamiento. Caso de Estudio 2.....	78
Tabla 6.11 Resultados para el Caso de Estudio 2.....	81

Tabla 6.12	Concentración de contaminante en los tramos (ppm). Caso de Estudio 2.....	82
Tabla 6.13	Intercambio de créditos óptimo para las fuentes puntuales $I_{r,t}$. Créditos comprados (+), créditos vendidos (-). Caso de Estudio 2.....	83
Tabla 6.14	Intercambio de créditos óptimo para las fuentes puntuales H_r . Créditos comprados (+), créditos vendidos (-). Caso de Estudio 2.....	84

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica de los antecedentes del problema que se pretende resolver y una descripción del mismo. Se incluye el objetivo general, la justificación y la organización y descripción del contenido de este trabajo.

1.1 INTERCAMBIO DE CRÉDITOS CONTAMINANTES

El término de intercambio de créditos de contaminantes (“Pollution Trading” en inglés) se refiere a una estrategia de mercado dirigida a controlar los recursos naturales y satisfacer un conjunto de límites ambientales. El objetivo global es alcanzar condiciones ambientales iguales o mejores que aquellas obtenidas a través del tratamiento de contaminantes, pero a un menor costo. Las empresas que cuenten con capacidad económica e infraestructura suficiente para reducir sus emisiones por debajo de los límites requeridos obtendrán créditos por ello. Estos créditos pueden ser vendidos a otras empresas para obtener beneficios económicos, o bien pueden ser acumulados para su uso futuro si los programas así lo permiten. Este concepto es atribuido a Croker (1966), Dales (1968) y Montgomery (1972). Las primeras aplicaciones de esta estrategia de mercado con efectos positivos fueron en el intercambio de créditos de emisiones contaminantes de SO_x y NO_x para control de la lluvia ácida (Ferral, 1991; Burtraw, 1996; Burtraw y col., 1996; Burtraw y Mansur, 1999; Burtraw y col., 2005). Entre los beneficios obtenidos a través de la implementación de esta estrategia podemos mencionar: *i*) significativas reducciones de costos relacionados al tratamiento de contaminantes, *ii*) flexibilidad para que las fuentes contaminantes satisfagan las reducciones ambientales fijadas, *iii*) creación de incentivos para reducir las emisiones contaminantes por debajo de los límites fijados, *iv*) la promoción de innovaciones tecnológicas e inversiones para obtener créditos y ganancias extra, *v*) el manejo adecuado de los recursos naturales, *vi*) mejoras en el cuidado y en la calidad del medio ambiente (tales como la mejora de la fauna silvestre y el co-control de otros contaminantes) (Rousseau, 2001; USEPA, 2004) y *vii*) beneficios en la calidad del ambiente para la población en los alrededores (Gray y Shadbegian, 2004). Esta estrategia también ha sido utilizada para el control de la calidad del

agua con resultados satisfactorios en el control y manejo de contaminantes (Rousseau, 2001; Woodward, 2002; USEPA 2004; USEPA, 2009; Lal y col., 2009; Selman y col., 2009; Smajgl y col., 2009).

La literatura reporta diversos modelos para describir los mecanismos de intercambio de créditos entre las diferentes fuentes contaminantes. Algunos de los modelos incorporan fuentes no puntuales de contaminantes producto de actividades agropecuarias (Jarvie y Solomon, 1998; Zhang y Wang, 2002; Wang y col., 2004; Luo y col., 2005; Ghosh y col., 2011), equilibrio de mercado y permisos para emitir contaminantes (Innes, 2002; Hung y Shaw, 2005; Bosetti y col., 2009). Algunos trabajos recientes analizan problemas más complejos y su efecto en las políticas de intercambio de créditos, como la dinámica e interacción de diferentes contaminantes (Sarang y col., 2008), las relaciones espaciales entre las fuentes emisoras de contaminantes (Roberts y col., 2008), enfoques novedosos para la determinación de la descarga máxima total diaria (TMDL) (Zhang, 2008; USEPA 1999) y el efecto potencia del intercambio de créditos para contaminación por bacterias y temperatura (Idaho Department of Environmental Quality, 2010). Además, también se ha estudiado el efecto de la heterogeneidad de las descargas, debido a que los contaminantes pueden no estar uniformemente mezclados y las emisiones no puntuales pueden variar en el espacio (Lankoski y col, 2008). Finalmente, el banco y préstamo de créditos puede ser considerado para el intercambio inter-temporal de créditos (Rubin, 1996; Kling y Rubin, 1997).

Por otra parte, se han reportado diversos trabajos relacionados con el trazo de los contaminantes a lo largo de cuerpos hidráulicos para evitar la acumulación peligrosa de los mismos en sus afluentes finales. Baccini y Brunner (1991) desarrollaron un modelo de análisis de flujo de materia (MFA) para analizar la interacción entre los ecosistemas y las

actividades humanas, donde se intercambian masa, energía e información con los alrededores. Además Lampert y Brunner (1999) propusieron un modelo para describir el comportamiento de las descargas de nutrientes a la cuenca del río Danubio. El-Baz y col. (2005a) presentaron un modelo de análisis de flujo de materia para describir el comportamiento de los componentes nitrosos en el sistema de drenaje Bahr El-Baqar en Egipto, y El-Baz y col. (2005b) presentaron un modelo de análisis de flujo de materia para incluir la integración de masa del mismo sistema de drenaje. De manera similar, Lovelady y col. (2009) y Lira Barragán y col. (2011,2012) propusieron modelos de programación matemática para instalar una nueva planta química en un cuerpo hidráulico utilizando la técnica de análisis de flujo de materia. Finalmente, Burgara-Montero y col. (2012) presentaron un modelo para el tratamiento industrial de los efluentes descargados a cuerpos hidráulicos utilizando una formulación de análisis de flujo de materia. Sin embargo, la estrategia de intercambio de créditos contaminantes nunca ha sido utilizada junto con una formulación MFA para describir el comportamiento de los contaminantes presentes en un cuerpo hidráulico.

En este trabajo se proponen dos modelos para optimizar los costos globales de instalación de tecnología para intercambio de créditos contaminantes en cuencas hidrológicas. El primero de ellos evita la creación de puntos con alta concentración de contaminantes e incorpora un sistema de penalizaciones económicas; el segundo modelo se enfoca en el intercambio de créditos contaminantes incorporando el análisis del comportamiento de los contaminantes en la cuenca hidrológica con base en un análisis de flujo de materia. Los modelos presentados son lineales y el objetivo es la minimización del costo anual total asociado con la

implementación de tecnología para tratamiento de contaminantes, satisfaciendo las regulaciones ambientales tomando en cuenta la sustentabilidad del sistema hidrológico.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo se resumen a continuación:

- Crear modelos de optimización con base en la programación matemática para asistir la toma de decisiones en procesos de intercambio de créditos contaminantes para tratamiento de efluentes contaminados.
- Incorporar conceptos de programación disyuntiva en los modelos desarrollados para mejorar el cálculo de costos relacionados con la implementación de tecnología.
- Elaborar casos de estudio con datos e información de sistemas reales para evaluar el desempeño de los modelos formulados.
- Analizar el impacto ambiental y económico de las soluciones encontradas con los modelos propuestos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad en nuestro país no existen estrategias económicas similares a la de intercambio de créditos contaminantes que sean útiles para el tratamiento de efluentes contaminados y emisiones atmosféricas. Se ha probado que la implementación de estas estrategias tiene mejores resultados que algunos de los métodos usados comúnmente (métodos de comando y control), ya que incentivan a las empresas a disminuir sus emisiones por debajo de los límites fijados para obtener beneficios económicos, y a invertir en investigación para la creación de tecnologías más eficientes para control de contaminantes.

La formulación de nuevos modelos que describan la implementación de las estrategias de mercadeo de créditos contaminantes puede resultar útil como guía para los organismos que regulan los recursos naturales y el medio ambiente, así como para quienes toman decisiones en las empresas. Por otra parte, el desarrollo de modelos de programación disyuntiva extiende los alcances de los modelos obtenidos mejorando su predictibilidad.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

La descripción detallada de los fundamentos teóricos, el desarrollo de los modelos y los resultados numéricos de este trabajo se proporcionan a lo largo de siete capítulos. Este Capítulo describe los antecedentes del intercambio de créditos de contaminantes y de la técnica de análisis de flujo de materia. La definición de los conceptos necesarios para el establecimiento del mercado de créditos de contaminante y el desarrollo de un modelo básico se muestran en el Capítulo 2. En el Capítulo 3 se definen los conceptos utilizados en el análisis de flujo de materia. La descripción del modelo de programación matemática desarrollado en este trabajo y las modificaciones a los alcances de este primer modelo se presentan en el Capítulo 4. El Capítulo 5 presenta el desarrollo de un segundo modelo que incorpora el análisis de flujo de materia en la estrategia de intercambio de créditos de contaminante. Los casos de estudio que demuestran la aplicabilidad y los alcances de los modelos propuestos se presentan en el Capítulo 6. Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones y propuestas para trabajos futuros.

Capítulo 2

CONCEPTOS BÁSICOS DEL INTERCAMBIO DE CRÉDITOS CONTAMINANTES

El presente capítulo describe algunos conceptos relacionados con el intercambio de créditos de contaminante en cuencas hidrológicas. Se incluye el modelo presentado por Shastri y col. (2005), que fue tomado como referencia para el desarrollo de este trabajo; además se presentan las deficiencias y posibles mejoras del dicho modelo.

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Desde las primeras aplicaciones del mercadeo de contaminantes, el interés en el uso de incentivos de mercado para controlar los recursos naturales se ha ido incrementando. El mercadeo de contaminantes para controlar la contaminación del agua tiene potencial tanto para industriales como para legisladores. Dado un conjunto de industrias descargando sus efluentes contaminados a un cuerpo hidráulico es necesario establecer el concepto del límite máximo total diario de descarga de contaminantes (TMDL) para controlar la calidad ambiental de la descarga de efluentes. Una vez que este límite ha sido establecido se deben identificar la cantidad requerida de disminución de contaminantes, las fuentes emisoras y su localización. Existen dos categorías para las fuentes contaminantes: fuentes puntuales y fuentes no puntuales. Las fuentes puntuales son aquellas cuyas emisiones se pueden medir (industrias, plantas municipales de tratamiento, etc.). Por otra parte, las fuentes no puntuales son aquellas cuyas emisiones no son conocidas y presentan dificultades para ser medidas (por ejemplo las descargas agrícolas). Con el límite establecido por los organismos reguladores y las fuentes contaminantes identificadas, se deben establecer los límites de concentración de contaminante para los efluentes de cada fuente puntual y las actividades requeridas para satisfacer los estándares de calidad del agua. De igual manera, se debe identificar el conjunto de tecnologías disponibles para tratamiento de efluentes contaminados; además, cada tecnología disponible tiene asociado un costo de tratamiento.

Por otra parte, se deben establecer diversos parámetros que afectan el mercadeo de contaminantes desde el punto de vista económico, tales como la relación de intercambio (cuántas unidades de reducción de contaminante debe llevar a cabo una fuente para recibir

un crédito de una unidad), el costo de transacción (costos para los participantes, que se originan como resultado del mercadeo de contaminantes) y el número de participantes.

Una vez que ha sido establecido el TMDL, a cada fuente puntual se le asigna un límite de descarga. Es posible que las fuentes puntuales requieran reducir sus descargas contaminantes para satisfacer el límite establecido. Para cumplir con ello se tienen dos opciones:

- a) Implementar métodos de tratamiento de contaminantes que involucran costos de capital y de operación. La implementación depende de las tecnologías disponibles, las cantidades de descarga a tratar y los niveles de reducción deseados. Los costos involucrados varían entre las diferentes fuentes puntuales.
- b) Intercambiar una cantidad particular de contaminante a otra fuente puntual que sea capaz de reducir sus descargas por debajo de los límites especificados por la regulación.

El problema consiste en determinar la configuración óptima para el intercambio de créditos contaminantes entre las diversas fuentes puntuales, minimizando los costos asociados a la implementación de tecnologías que permitan satisfacer las restricciones ambientales. Una fuente puntual puede comprar o vender créditos siempre y cuando se satisfaga el límite de concentración para sus descargas. La función objetivo consiste en la minimización de los costos asociados con la implementación de las tecnologías requeridas en la solución óptima.

La Figura 2.1 muestra una cuenca hidrológica de manera general en la cual el proceso de intercambio de créditos contaminantes es representado. Una vez que el límite de descarga máxima total diaria (TMDL) ha sido establecido, una fuente puntual tiene dos opciones para controlar sus efluentes; implementar alguna de las tecnologías disponibles para control de contaminantes o comprar créditos a otra fuente puntual.

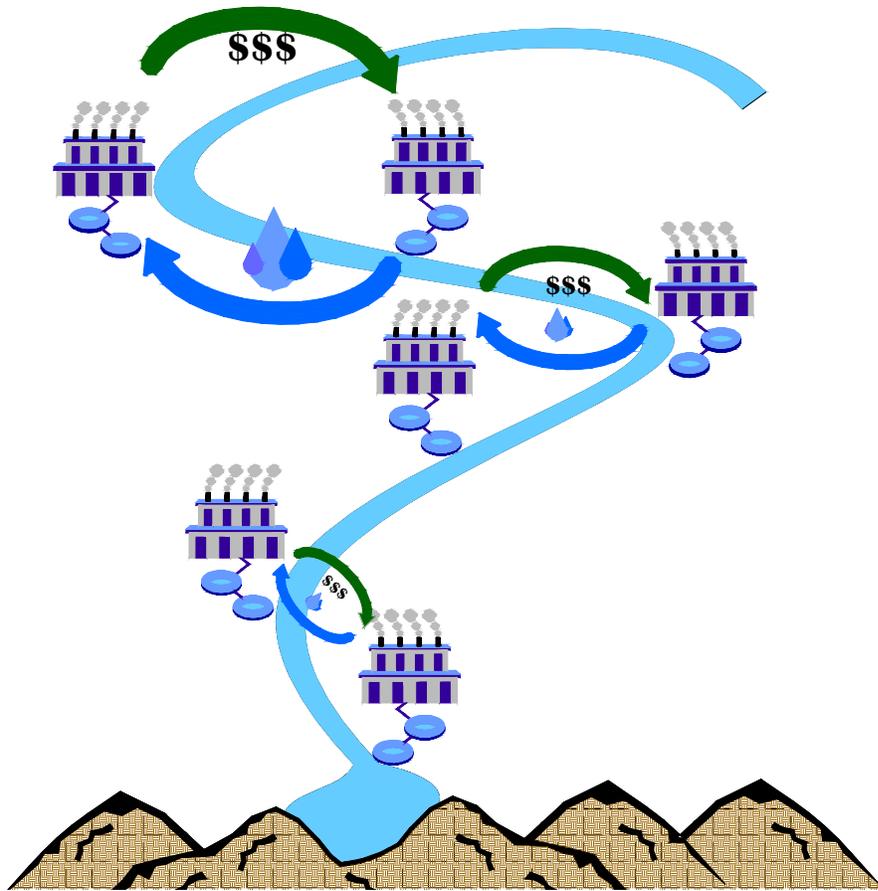


Figura 2.1 Intercambio de créditos contaminantes entre fuentes puntuales

2.2 MODELO DE REFERENCIA PARA EL INTERCAMBIO DE CRÉDITOS DE CONTAMINANTES

Shastri y col. (2005) desarrollaron un modelo de programación matemática para representar la estrategia de intercambio de créditos de contaminantes. Esta formulación se ha tomado como punto de partida en este trabajo. El modelo considera un conjunto de fuentes contaminantes con una descarga específica a un cuerpo de agua. Cada fuente puntual puede implementar alguna tecnología de tratamiento de efluentes para reducir sus emisiones contaminantes a los niveles deseados impuestos por el Límite Máximo Total Diario de descarga (TMDL) establecido por las autoridades.

PS_i representa una fuente puntual descargando contaminante a un cuerpo de agua en común, donde $i = 1, \dots, N$. Existen diversos parámetros asociados cada fuente puntual, estos parámetros se describen a continuación:

D_i Descarga volumétrica por parte de PS_i (volumen/año).

c_i Concentración de la descarga contaminante de PS_i (masa/volumen).

a_i Descarga de contaminante de PS_i (masa/año).

L_i Descarga permitida de contaminante con base en el límite de descarga máxima total diaria (*TMDL*) (masa/año).

P_i Costo de tratamiento por parte de PS_i para reducir sus contaminantes cuando el intercambio no es posible.

red_i Reducción deseada de contaminantes en las descargas de PS_i (masa/año). Su valor puede ser calculado a través de la Ecuación (2.1):

$$red_i = D_i \cdot c_i - L_i = a_i - L_i \quad (2.1)$$

Existen dos alternativas para cada PS_i : comprar créditos de otra PS_k o instalar tecnología para reducir sus efluentes contaminados. El modelo puede ser formulado como:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M TC_j \cdot D_i \cdot b_{ij} \quad (2.2)$$

sujeto a:

$$t_{ii} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (2.3)$$

$$red_i \leq \sum_{j=1}^M q_j \cdot D_i \cdot b_{ij} + \sum_{k=1}^N t_{ik} - r \sum_{k=1}^N t_{ki} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (2.4)$$

$$P_i \geq \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot TC_j \cdot D_i + F \left(\sum_{k=1}^N t_{ik} - \sum_{k=1}^N t_{ki} \right) \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (2.5)$$

donde $j = 1, \dots, M$ es el conjunto de tecnologías disponibles para reducción de contaminantes que pueden ser instaladas por cualquier fuente contaminante.

TC_j es el costo total de tratamiento (\$/volumen tratado) para la tecnología j .

q_j es la reducción potencial de contaminante que se puede llevar a cabo mediante la implementación de la tecnología j (masa/volumen)

El costo total de tratamiento (TC_j) es la suma del costo anual total; el cual incluye costos de capital, mantenimiento y operación. Además se considera que la compra y venta de créditos es posible entre todas las fuentes puntuales y existe una política que especifica que a lo más un sólo intercambio puede existir entre cada posible par de fuentes puntuales. Por lo tanto, sólo se puede aplicar una relación de intercambio y un precio para cada crédito intercambiado.

Existen dos parámetros relacionados con el intercambio de créditos. El primero es la relación de intercambio y está representado por r ; el otro es el costo de transacción (\$/masa) que deberá pagar una fuente puntual a otra por controlar sus efluentes contaminados y está

representado por F . El objetivo del modelo es satisfacer los límites de descarga (generalmente establecidos por el $TMDL$) a un costo mínimo.

b_{ij} representa las variables binarias que modelan la relación fuente puntual-tecnología implementada. b_{ij} es igual a 1 cuando PS_i instala la tecnología j y 0 para el caso contrario.

t_{ik} representa los créditos de contaminante comprados por la fuente PS_i a la fuente PS_k (masa/año).

P_i es la solución del modelo cuando el intercambio de créditos de contaminante no es posible. Todos los parámetros anteriores se encuentran en base anual.

La función objetivo definida por la Ecuación (2.2) es igual a la suma de los costos de implementación de tecnología por parte de cada fuente contaminante. La Ecuación (2.3) elimina la posibilidad de intercambio de créditos de contaminante entre una misma fuente puntual. La restricción de la Ecuación (2.4) asegura que se satisfagan las restricciones ambientales. Finalmente, en la Ecuación (2.5) se indica que el costo incurrido por cada fuente puntual cuando existe el intercambio de créditos de contaminante debe ser igual o menor que el costo de abatimiento de contaminantes cuando esta estrategia no existe. El problema se describe como un problema de Programación Mixta-Entera Lineal (MILP).

2.3 LIMITACIONES DEL MODELO DE REFERENCIA

El modelo anteriormente descrito es general y puede ser aplicado a cualquier cuerpo de agua y a cualquier contaminante. Sin embargo, el modelo tiene algunas limitaciones como por ejemplo:

- El planteamiento del modelo no considera la localización de las fuentes contaminantes a lo largo de la cuenca hidrológica, ni el efecto de la localización en los resultados del intercambio de créditos contaminantes.
- Sólo se consideran fuentes puntuales en el planteamiento del problema.
- No asegura que se evite la creación de puntos localizados con alta concentración de contaminantes ('hotspots').
- No se contempla la situación en que las fuentes contaminantes no satisfagan los límites ambientales establecidos, ni un sistema de penalizaciones para esos casos.
- No se consideran los efectos de la asimilación de contaminantes dentro de la cuenca hidrológica.
- El modelo no describe el comportamiento del sistema antes y después de la implementación del intercambio de créditos.

Los modelos propuestos en este trabajo toman algunos de los conceptos presentados en el modelo de referencia y mejoran las deficiencias antes mencionadas.

Capítulo 3

PRINCIPIOS DEL ANÁLISIS DE FLUJO DE MATERIA

Este capítulo presenta la metodología desarrollada por El-Baz y col. (2005) para el desarrollo del modelo de análisis de flujo de materia (MFA) aplicado a sistemas hidráulicos.

3.1 INTRODUCCIÓN

El análisis de flujo de materia (MFA) es una herramienta importante para el control ambiental, busca caracterizar las causas de los problemas de contaminación en un sistema ecológico analizando las principales actividades, fuentes, sumideros y rutas de los contaminantes en el sistema. Baccini y Bruner (1991) desarrollaron el concepto del análisis de flujo de materia para determinar el metabolismo antropogénico de algunas regiones. En el siguiente subtema se describe la metodología presentada por El-Baz y col. (2005) para el desarrollo del modelo de análisis de flujo de materia.

3.2 DESARROLLO DEL MODELO DE MFA

Para el desarrollo del modelo se considera un sistema de drenaje con diversos tributarios y tramos de río. Las fuentes puntuales y no puntuales de contaminante incluyen diversos efluentes tales como las descargas agrícolas, aguas tratadas y no tratadas, efluentes industriales y efluentes pluviales. Las salidas del sistema incluyen descargas a lagos, ríos, usos oficiales y no oficiales para agricultura y otros propósitos, filtración y evaporación. Además, se considera que en el sistema ocurren diversas reacciones químicas y bioquímicas que dan lugar a la generación y consumo de especies.

El problema se representa como un problema de múltiples etapas en base a los tramos de río. La cuenca se compone de canales, drenajes, tributarios (entradas) y distributarios (salidas). Para descomponer los cálculos se discretiza la cuenca en un número de tramos N_{reach} . El índice $i = 1, 2, \dots, N_{reach}$ será usado para designar varios tramos. A cada tramo están asociados $N_{Trib,i}$ tributarios que se denotan por el índice j ($j = 1, 2, \dots, N_{Trib,i}$). Las Figuras 3.1 y 3.2

representan los procesos mencionados en tributarios y tramos de río respectivamente. Cada tributario está rodeado por diversos sistemas que descargan o consumen agua. La relación entre los tributarios y los alrededores se describe mediante operadores matemáticos o funciones de transferencia que sirven para identificar las corrientes de entrada a los tributarios.

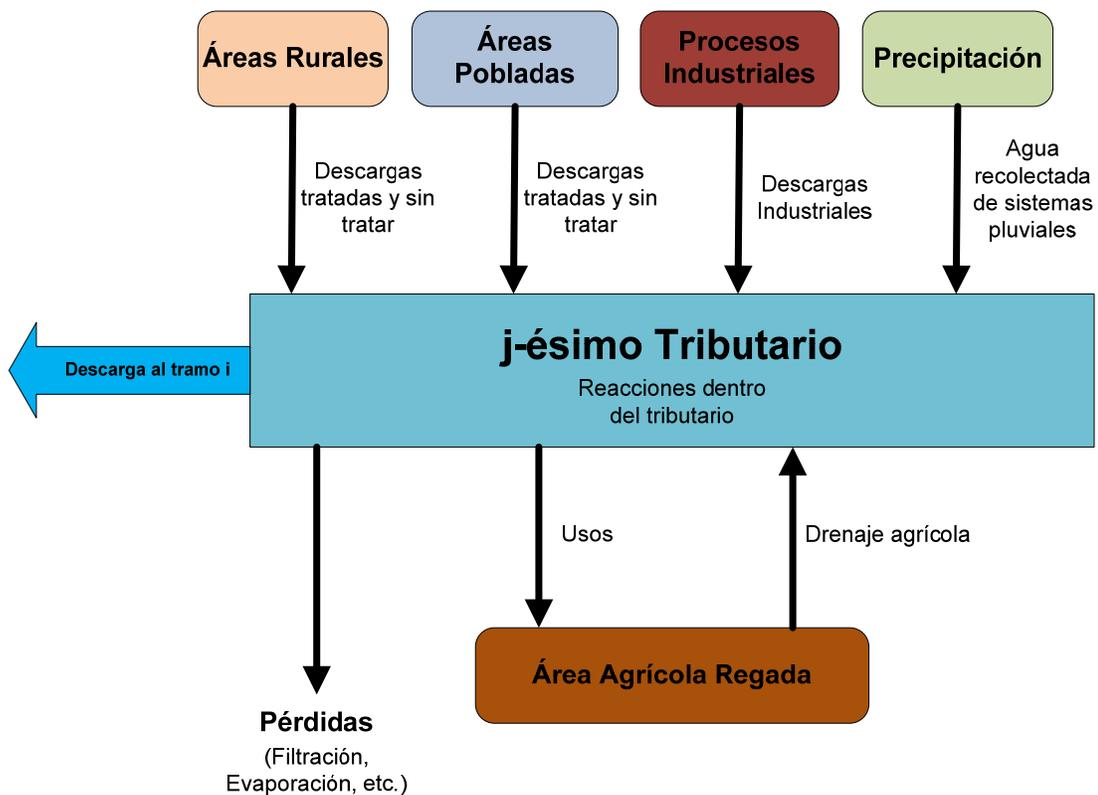


Figura 3.1 Representación de un tributario y sus alrededores

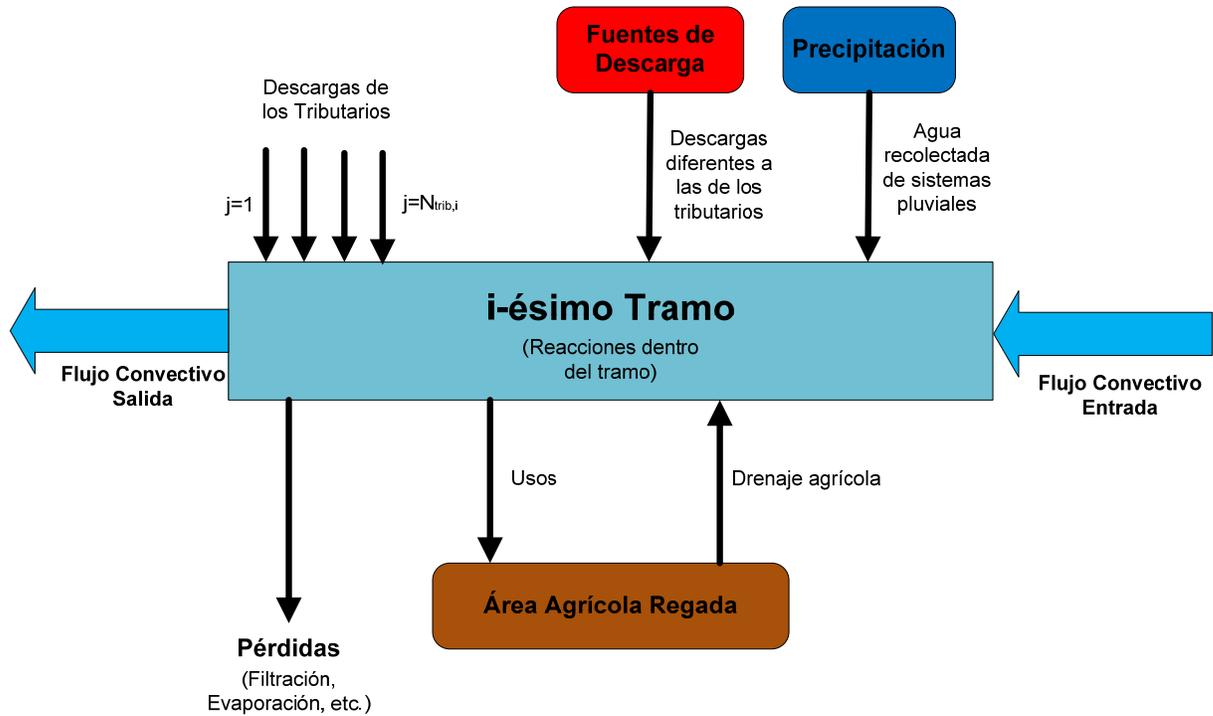


Figura 3. 1 Representación de un tramo y sus alrededores

Se considera un periodo de tiempo t en el cual los flujos se promedian. El balance de materia global para el tramo i -ésimo está dado por la Ecuación 3.1:

$$Q_{i,t} = Q_{i-1,t} + P_{i,t} + D_{i,t} + H_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_{Trib,i}} T_{j,i,t} - L_{i,t} - U_{i,t} \quad (3.1)$$

donde:

$Q_{i,t}$ es el flujo convectivo que abandona el i -ésimo tramo, m^3 / s

$Q_{i-1,t}$ es el flujo convectivo que entra al i -ésimo tramo, m^3 / s

$P_{i,t}$ es el flujo debido a descargas pluviales en el i -ésimo tramo, m^3 / s

$L_{i,t}$ representa las pérdidas totales en el i -ésimo tramo (debidas a evaporación, filtración, usos, etc.), m^3 / s

$D_{i,t}$ representa las descargas directas al i -ésimo tramo no provenientes de los tributarios, m^3 / s

$H_{i,t}$ representa el total de las descargas al i -ésimo tramo (descargas industriales + descargas sanitarias), m^3 / s

$T_{j,i,t}$ representa la descarga del j -ésimo tributario en el i -ésimo tramo, m^3 / s

$U_{i,t}$ representa el flujo distribuido por el i -ésimo tramo para un uso en particular, m^3 / s

A continuación se realiza un balance de materia por componente en el tramo correspondiente. Se parte de un elemento diferencial de volumen (dV). La Figura 3.3 representa las entradas y salidas del elemento de volumen:

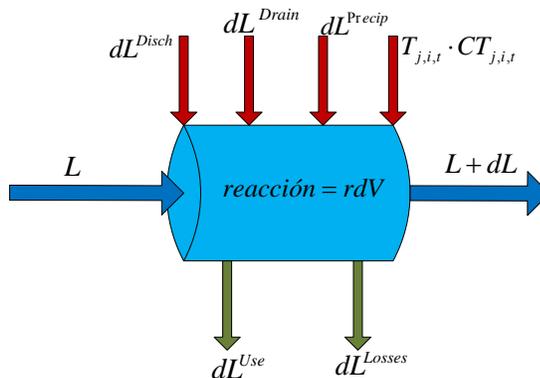


Figura 3. 3 Balance de materia por componente en un elemento de volumen de un tramo

donde cada término se describe a continuación:

L	flujo másico del componente que entra al elemento de volumen a través de flujo convectivo (kg/s)
$L + dL$	flujo másico del componente que abandona el elemento de volumen a través de flujo convectivo
dL^{Disch}	flujo másico del componente que entra al elemento de volumen a través de diversas descargas (industriales, sanitarias, etc.)
dL^{Drain}	flujo másico del componente que entra al elemento de volumen a través del drenaje agrícola
dL^{Precip}	flujo másico del componente que entra al elemento de volumen mediante las descargas pluviales
$T_{j,i,t} \cdot CT_{j,i,t}$	flujo másico del componente que entra al elemento de volumen debido a las descargas del tributario j
dL^{Use}	flujo másico del componente que abandona el elemento de volumen para algún uso (por ejemplo para irrigar un área agrícola)
dL^{Loss}	flujo másico del componente que abandona el elemento de volumen debido a pérdidas (por ejemplo filtración, evaporación)

El término de velocidad de desaparición del componente debido a reacciones químicas, se expresa como rdV , donde r es la velocidad cinética de reacción.

Si se lleva a cabo un balance de materia por componente en el elemento de volumen, se obtiene:

$$L + dL^{Disch} + dL^{Precip} + dL^{Drain} + T_{j,i,t} \cdot CT_{j,i,t} = L + dL + dL^{Use} + dL^{Loss} + rdV \quad (3.2)$$

Integrando la Ecuación 3.2 desde la entrada del tramo a su salida se obtiene:

$$\int_{reach\ i} dL^{Disch} + \int_{reach\ i} dL^{Precip} + \int_{reach\ i} dL^{Drain} + \int_{reach\ i} T_{j,i,t} \cdot CT_{j,i,t} = \int_{reach\ i} dL + \int_{reach\ i} dL^{Use} + \int_{reach\ i} dL^{Loss} + \int_{reach\ i} rdV \quad (3.3)$$

La Ecuación 3.3 se puede reescribir como:

$$Q_{i,t} \cdot CQ_{i,t} = Q_{i-1,t} \cdot CQ_{i-1,t} + H_{i,t} \cdot CH_{i,t} + P_{i,t} \cdot CP_{i,t} + D_{i,t} \cdot CD_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_{Trib,i}} T_{j,i,t} \cdot CT_{j,i,t} - L_{i,t} \cdot CL_{i,t} - U_{i,t} \cdot CU_{i,t} - \int_{V=0}^{V_{i,t}} r_{i,t} dV_{i,t} \quad (3.4)$$

Utilizando la siguiente notación:

$Q_{i,t} \cdot CQ_{i,t}$ flujo másico del componente que abandona el tramo a través de flujo convectivo (donde $CQ_{i,t}$ es la concentración de componente en la corriente que abandona el tramo i)

$Q_{i-1,t} \cdot CQ_{i-1,t}$ flujo másico del componente que entra al tramo a través de flujo convectivo

- $H_{i,t} \cdot CH_{i,t}$ flujo másico del componente debido a las descargas en el tramo i
(descargas industriales + descargas sanitarias)
- $P_{i,t} \cdot CP_{i,t}$ flujo másico del componente debido a descargas pluviales sobre el
tramo i
- $D_{i,t} \cdot CD_{i,t}$ flujo másico del componente debido a las descargas de drenajes sobre
el tramo
- $L_{i,t} \cdot CL_{i,t}$ flujo másico del componente que abandona el tramo i debido a
pérdidas del sistema (por ejemplo: evaporación o filtración)
- $U_{i,t} \cdot CU_{i,t}$ flujo másico del componente que abandona el tramo i debido a su uso
en diversas actividades (por ejemplo: desviación de un cauce para
riego agrícola)

El término integral de la Ecuación 3.4 se puede evaluar numéricamente. Sin embargo, existen varios casos importantes en los cuales la integral se puede evaluar analíticamente. Por ejemplo, si se considera que cada tramo está completamente mezclado, la velocidad de reacción se puede evaluar a las condiciones de salida obteniéndose:

$$\int_{V=0}^{V_{i,t}} r_{i,t} dV_{i,t} = r(CQ_{i,t})V_{i,t} \quad (3.5)$$

Para los tributarios se desarrollan Ecuaciones similares a la Ecuación 3.4. La descarga de los tributarios se puede calcular mediante la Ecuación 3.6:

$$T_{j,i,t} \cdot CT_{j,i,t} = S_{j,i,t}^{untreated} \cdot CS_{j,i,t}^{untreated} + S_{j,i,t}^{treated} \cdot CS_{j,i,t}^{treated} + I_{j,i,t} \cdot CI_{j,i,t} + P_{j,i,t} \cdot CP_{j,i,t} + D_{j,i,t} \cdot CD_{j,i,t} - L_{j,i,t} \cdot CL_{j,i,t} - U_{j,i,t} \cdot CU_{j,i,t} - r_{j,i,t} \cdot V_{j,i,t} \quad (3.6)$$

donde:

- $S_{j,i,t}^{untreated}$ flujo de drenaje sin tratar descargado al j -ésimo tributario, m^3 / s
- $S_{j,i,t}^{treated}$ flujo de drenaje tratado descargado al j -ésimo tributario, m^3 / s
- $I_{j,i,t}$ flujo de drenajes industriales descargados al j -ésimo tributario, m^3 / s
- $P_{j,i,t}$ flujo pluvial descargado al j -ésimo tributario, m^3 / s
- $L_{j,i,t}$ pérdidas (evaporación, filtración) del j -ésimo tributario, m^3 / s
- $D_{j,i,t}$ drenaje agrícola descargado al j -ésimo tributario, m^3 / s

Capítulo 4

MODELOS DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA EL INTERCAMBIO DE CRÉDITOS CONTAMINANTES

En este capítulo se presenta el desarrollo de modelos de programación matemática para asistir la toma de decisiones en procesos de intercambio de créditos contaminantes. El modelo inicial es un problema Mixto Entero lineal y está basado en el trabajo de Shastri y col. (2005). A esta formulación se añaden algunas restricciones para incluir consideraciones adicionales, tales como evitar la creación de puntos con alta concentración de contaminantes y la incorporación de un sistema de penalizaciones económicas para las fuentes contaminantes que no satisfagan las restricciones ambientales.

4.1 FORMULACIÓN DEL MODELO BASE

A continuación se propone un modelo original de programación matemática para representar la estrategia de intercambio de créditos de contaminantes. Esta formulación considera un conjunto de fuentes contaminantes con una descarga específica a un cuerpo de agua. Cada fuente puntual puede implementar alguna tecnología de tratamiento de efluentes para reducir sus emisiones contaminantes a los niveles deseados impuestos por el Límite Máximo Total Diario de descarga (*TMDL*) establecido por las autoridades. El *TMDL* se fija conociendo la cantidad máxima de contaminante (masa) que un cuerpo de agua puede asimilar sin causar daños ecológicos en el mismo. Todas las fuentes puntuales pueden implementar alguna de las tecnologías disponibles para tratamiento de contaminantes, o pueden comprar los créditos de contaminante disponibles. Existen diversos parámetros asociados a cada fuente puntual PS_i . VD_i es el volumen de descarga de agua contaminada por parte de la fuente PS_i (volumen/año); C_i^0 es la concentración de contaminante en la descarga de PS_i (masa/volumen); LC es el límite de concentración de contaminante para todas las fuentes puntuales (masa/volumen); $i=1, \dots, N$ es el conjunto de fuentes puntuales. El cálculo del límite LC se basa en la regulación del *TMDL*, de la siguiente manera:

$$LC = \frac{TMDL}{\sum_{i=1}^N VD_i} \quad (4.1)$$

Se debe notar que aunque la definición del *TMDL* implica una base diaria para el límite de descargas, se supone a lo largo de las formulaciones que la regulación está dada en una base anual. Existen dos parámetros relacionados con el intercambio de créditos contaminantes.

Uno de ellos es la relación de intercambio (r), mientras que el otro es el costo de intercambio (PC). El valor de r representa el número de unidades de reducción de contaminante que una fuente debe comprar para obtener un crédito de una unidad de contaminante. PC es el costo de un crédito de contaminante que debe ser pagado por una fuente puntual a otra por controlar sus efluentes contaminados.

Existen dos alternativas para cada PS_i , comprar créditos de otra fuente contaminante o instalar tecnología para reducir sus emisiones. $j=1,\dots,M$ representa el conjunto de tecnologías disponibles a ser instaladas por cualquier fuente puntual. Para el desarrollo del modelo se utilizan las siguientes definiciones:

- MD_i^0 descarga inicial de contaminante (descarga cuando no hay implementación de tecnología ni intercambio de créditos) por parte de PS_i (masa/año).
- LM_i descarga másica máxima permisible para una PS_i con base en el $TMDL$ (masa/año).
- CTI_{ij} costo de la implementación de la tecnología j en la fuente PS_i (\$/año).
- TAC_j costo total anualizado de la tecnología de tratamiento j (\$/volumen tratado).
- MC límite superior del número de créditos contaminantes que una fuente puntual PS_i tiene permitido vender o comprar (masa/año).

rp_{ij}	contaminante removido en las descargas de la fuente PS_i a través de la implementación de la tecnología j (masa/volumen tratado).
prc_j	reducción potencial de contaminante por parte de la tecnología j (masa/volumen tratado).
MPD_i	masa de contaminante descargado por la fuente PS_i después de que se han implementado las tecnologías de tratamiento de contaminante (masa/año).
$Cpurch_i$	cantidad total de créditos comprados por una PS_i (masa/año).
$Csold_i$	cantidad total de créditos vendidos por una PS_i (masa/año).
$PRTC_i$	reducción de contaminantes lograda por la fuente PS_i únicamente a través del intercambio de créditos contaminantes (masa/año).
CPT_i	costo total del intercambio de créditos contaminantes (compra o venta) para una PS_i (\$/año).

Las variables binarias yp_i y ys_i están relacionadas con la compra y venta de créditos de contaminante respectivamente; son iguales a 1 cuando el intercambio de créditos existe, y 0 en caso contrario. b_{ij} son las variables binarias que representan la relación fuente puntual – tecnología instalada. b_{ij} es igual a 1 cuando la fuente PS_i instala la tecnología j , y 0 en caso contrario. CC_{ik} son los créditos comprados por la fuente PS_i a la fuente PS_k

(masa/año). Como se mencionó con anterioridad, todos los parámetros se encuentran en base anual.

Dadas todas las definiciones previas, el modelo se describe a continuación. La función objetivo se muestra en la Ecuación 4.2:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M CTI_{ij} \quad (4.2)$$

El objetivo del modelo es satisfacer las restricciones ambientales impuestas por el *TMDL* a un costo global mínimo. La Ecuación 4.2 representa la minimización de los costos relacionados con la implementación de las diferentes tecnologías disponibles para control de efluentes contaminados (la sumatoria de los costos de implementación de tecnología para cada fuente puntual). En este problema se optimiza de manera global el costo de las tecnologías implementadas. Los costos relacionados con la compra y venta de créditos de contaminante no se consideran en la función objetivo. Se considera que el beneficio económico obtenido por una fuente PS_k debido a la venta de CC_{ik} créditos, es igual a los costos pagados por la fuente PS_i por comprar dichos créditos.

La función objetivo está sujeta a las restricciones mostradas por las Ecuaciones 4.3 a 4.16:

$$CTI_{ij} = TAC_j \cdot VD_i \cdot b_{ij} \quad \forall i, j \quad (4.3)$$

En la Ecuación 4.3, el costo total anualizado de implementación de tecnología (TAC_j) incluye costos de capital, mantenimiento y operación asociados a la tecnología j . Los costos asociados a la implementación de tecnología y la capacidad de reducción de contaminante de cualquier proceso, se espera que sean no lineales con respecto a la

capacidad de tratamiento, la concentración y las características de los efluentes a ser tratados. Sin embargo, la Ecuación 4.3 supone que los costos de implementación de tecnología varían de manera lineal con respecto a la descarga volumétrica de efluente contaminado. Esta consideración evita no linealidades y no convexidades en la formulación propuesta.

Se permite la compra y venta de créditos entre todas las fuentes puntuales. En las Ecuaciones 4.4 y 4.5 se calcula el total de créditos comprados y vendidos por una fuente contaminante.

$$C_{purch_i} = \sum_{k=1}^N CC_{ik} \quad \forall i \quad (4.4)$$

$$C_{sold_i} = \sum_{k=1}^N CC_{ki} \quad \forall i \quad (4.5)$$

La reducción total de contaminante lograda por una PS_i a través de la compra y venta de créditos contaminantes se calcula en la Ecuación 4.6.

$$PRTC_i = \frac{1}{r} \cdot C_{purch_i} - C_{sold_i} \quad \forall i \quad (4.6)$$

La Ecuación 4.7 evita el intercambio de créditos de contaminante entre la misma fuente contaminante:

$$CC_{ii} = 0 \quad \forall i \quad (4.7)$$

Las Ecuaciones 4.8 y 4.9 son una formulación de la Big-M y establecen el límite de compra o venta total de créditos contaminantes en términos de las variables binarias correspondientes.

$$C_{purch_i} \leq MC \cdot yp_i \quad \forall i \quad (4.8)$$

$$C_{sold_i} \leq MC \cdot ys_i \quad \forall i \quad (4.9)$$

Existe una política en la cual a lo más debe existir un solo intercambio entre cada posible par de fuentes puntuales; por lo tanto, sólo se puede aplicar una relación de intercambio y un costo por crédito intercambiado para cada par de fuentes contaminantes. La Ecuación 4.10 excluye la posibilidad de que una fuente PS_i compre y venda créditos simultáneamente, existiendo la posibilidad de que no realice ninguna transacción.

$$yp_i + ys_i \leq 1 \quad \forall i \quad (4.10)$$

En la Ecuación 4.11 se calculan los costos debidos a la compra-venta de créditos para cada fuente contaminante PS_i .

$$CPT_i = PC \cdot [C_{purch_i} - C_{sold_i}] \quad \forall i \quad (4.11)$$

El límite másico de descarga de contaminante con base en el límite de descarga máxima total diaria (*TMDL*) se calcula en la Ecuación 4.12.

$$LM_i = VD_i \cdot LC \quad \forall i \quad (4.12)$$

En la Ecuación 4.13 se calcula la descarga másica de contaminante por parte de PS_i al inicio del periodo (sin que exista el intercambio de créditos de contaminante o se implemente alguna de las tecnologías de tratamiento de contaminantes disponibles).

$$MD_i^0 = VD_i \cdot C_i^0 \quad \forall i \quad (4.13)$$

La cantidad de contaminante removido a través de la implementación de tecnología se calcula a partir de la Ecuación 4.14.

$$rp_{ij} = prc_j \cdot VD_i \cdot b_{ij} \quad \forall i, j \quad (4.14)$$

Al igual que en la Ecuación 4.3, la Ecuación 4.14 supone que la capacidad de reducción de contaminante varía linealmente con la descarga volumétrica de efluente contaminado.

La cantidad de contaminante liberada por cada fuente puntual PS_i después de la implementación de tecnología se calcula en la Ecuación 4.15.

$$MPD_i = MD_i^0 - \sum_{j=1}^M rp_{ij} \quad \forall i \quad (4.15)$$

Finalmente, la Ecuación 4.16 es la restricción ambiental principal. En esta restricción se establece que la masa de contaminante liberada después de la implementación de tecnología menos la reducción de contaminante lograda a través de la compra venta de créditos contaminantes debe ser menor o igual que el límite de descarga fijado (establecido a través del *TMDL*).

$$LM_i \geq MPD_i - PRTC_i \quad \forall i \quad (4.16)$$

El modelo resultante se describe de la Ecuación 4.2 a la Ecuación 4.16, y es un modelo de programación mixta entera lineal (MILP). El modelo presentado es general y puede ser aplicado a cualquier cuenca hidrológica y a cualquier contaminante.

Si se desea conocer la solución al problema cuando el intercambio de créditos no es posible, y la reducción de contaminantes se lleva a cabo únicamente a través de la implementación de tecnología, se debe resolver la formulación planteada igualando todos los valores CC_{ik} a cero.

Se debe notar que el modelo tiene algunas limitaciones, como por ejemplo:

- La localización geográfica de las fuentes contaminantes a lo largo de la cuenca hidrológica no se considera en el análisis, y tampoco se asegura que se evite la creación de puntos calientes.
- No se contemplan los escenarios en los cuales las fuentes contaminantes no pueden satisfacer las restricciones ambientales establecidas (estos casos requieren la implementación de una estrategia de penalización económica).

4.2 EXTENSIÓN DEL ALCANCE DEL MODELO BASE

Dadas las limitaciones del modelo mencionadas en la sección anterior, se proponen dos extensiones de los alcances del modelo base. La primera está dirigida a evitar la creación de puntos localizados con alta concentración de contaminante ('puntos calientes'). La segunda propone la incorporación de un sistema de penalizaciones económicas para aquellas fuentes contaminantes que no cumplan las restricciones ambientales después de la implementación de tecnología y de la estrategia de intercambio de créditos contaminantes.

4.2.1 Puntos localizados con alta concentración de contaminante (‘puntos calientes’)

La implementación de la estrategia de intercambio de créditos de contaminante puede dar lugar a consecuencias ambientales negativas debido a la presencia de puntos localizados con alta concentración de contaminantes (‘puntos calientes’). Es probable que estas situaciones se presenten debido a la existencia de algunas fuentes con emisiones mayores al límite impuesto por el TMDL, aunque las restricciones ambientales globales se satisfagan debido al intercambio de créditos de contaminante. La extensión del daño ambiental no sólo depende del nivel de las emisiones contaminantes, sino también de la localización de las fuentes emisoras de contaminante.

Este trabajo propone un esquema alternativo para incorporar el efecto de la localización de las fuentes puntuales en el sistema de intercambio de créditos contaminantes. Mientras que en el caso de contaminantes atmosféricos usualmente la dispersión de contaminantes se lleva a cabo de manera multidireccional a través del viento, los contaminantes en el agua siempre fluyen al nivel más bajo de manera unidireccional. Para evitar la presencia de puntos calientes se supone que las fuentes puntuales se pueden distribuir geográficamente en la cuenca hidrológica de tal manera que se pueden localizar de aguas arriba a aguas abajo.

Las fuentes puntuales cercanas entre sí se pueden localizar en regiones en términos de su localización geográfica. Estas zonas geográficas estarán representadas por el conjunto G , donde $G = \{1, \dots, L\}$ y el índice l donde $l \in L$. En este caso una zona geográfica podría quedar definida como un área en la cual las características de dispersión de contaminantes y los efectos ambientales de las emisiones contaminantes son iguales. Cada fuente puntual PS_l

pertenece a una zona geográfica l , y puede haber más de una PS_i en una zona geográfica. Por lo tanto, puede haber N_l fuentes contaminantes en la zona geográfica l . También es necesario introducir un nuevo parámetro, SF , el cual representa un factor ambiental límite. El factor SF multiplicado por el límite impuesto por el $TMDL$ nos permite establecer el valor a partir del cual una descarga contaminante puede ser considerada un punto caliente. En la restricción resultante, las reducciones debidas al mercadeo de contaminantes no se incluyen, esto se muestra en la Ecuación 4.17.

$$SF_l \sum_{i=1}^{N_l} LM_i \geq \sum_{i=1}^{N_l} MPD_i \quad \forall l = 1, \dots, L \quad (4.17)$$

La Ecuación 4.17 se aplica a cada zona geográfica definida dentro del conjunto $\{1, \dots, L\}$; implica que la cantidad total de contaminante presente en una corriente después de que se ha llevado a cabo la reducción de contaminantes únicamente a través de implementación de tecnología, debe ser igual o menor que la descarga permitida para cada fuente puntual multiplicada por SF_l . Por lo tanto, las fuentes puntuales localizadas en una misma área geográfica deben disminuir (sin el uso del intercambio de créditos contaminantes) sus descargas contaminantes por debajo del límite establecido por el producto de $TMDL$ y el factor SF_l .

Como una aproximación inicial, el factor ambiental límite SF_l puede ser fijado por heurísticas (estudios ambientales) considerando dosis letales de contaminante. Este factor podría ser diferente para cada zona geográfica, aunque en el caso de estudio se considera que su valor es igual para todas las zonas geográficas. En el caso de estudio se muestra el efecto

de este factor en las decisiones óptimas. La primera extensión al modelo base involucra la adición de la Ecuación 4.17.

4.2.2 Penalizaciones económicas

Como una segunda extensión al modelo base propuesto en este trabajo, se propone una estrategia para penalizar a aquellas compañías que no satisfagan el límite impuesto por el *TMDL* incluso después del intercambio de créditos de contaminante; este caso pretende incluir escenarios prácticos donde alguna fuente puntual no pueda cumplir las regulaciones ambientales. Por lo tanto, el primer paso para incluir penalizaciones económicas es remover las Ecuaciones 4.16 (y la Ecuación 4.17 en el caso de restricciones geográficas) del Modelo Base.

4.2.2.1 Penalizaciones Económicas: Alternativa I

Se propone añadir una nueva variable dif_i . Esta variable representa la diferencia entre el nivel deseado de reducción y la reducción lograda después de que se han implementado las estrategias económicas y se ha instalado tecnología. La restricción ambiental se redefine como:

$$LM_i \geq MPD_i - PRTC_i - dif_i \quad \forall i \quad (4.18)$$

Se debe notar que la Ecuación 4.18 es una relajación de la Ecuación 4.16, y se requiere una penalización para el nuevo término dif_i . Por lo tanto, la función objetivo es modificada para incorporar un nuevo término, el cual representa las multas incurridas por las fuentes puntuales cuando éstas no pueden satisfacer los límites impuestos por el *TMDL*.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M CTI_{ij} + F_i \sum_{i=1}^N dif_i \quad (4.19)$$

donde F_i es el valor de la penalización impuesta a una fuente puntual por emitir más contaminante del permitido y violar las regulaciones ambientales (\$/masa). La definición de la penalización económica debe ser provista por el estado o el organismo encargado de regular las condiciones ambientales. En este trabajo este parámetro se estima a través de los siguientes cálculos:

$$TP = \sum_{i=1}^N P_i \quad (4.20)$$

donde TP representa el costo total cuando el intercambio de créditos contaminantes no es posible y las regulaciones ambientales se satisfacen únicamente a través de implementación de las diversas tecnologías de tratamiento. Este parámetro se debe evaluar resolviendo el Modelo Base cuando el intercambio de créditos no es posible. TDR representa la reducción total de contaminante deseada, dado el valor del $TMDL$:

$$TDR = \sum_{i=1}^N red_i \quad (4.21)$$

Por lo tanto, CPG es igual al costo por gramo de reducción cuando la reducción total deseada se lleva a cabo solamente a través de la implementación de tecnología:

$$CPG = \frac{TP}{TDR} \quad (4.22)$$

Finalmente, F_i se calcula a través de la Ecuación 4.23:

$$F_i = \phi \cdot CPG \quad (4.23)$$

Resumiendo, F_i representa la multa (dólares por unidad de masa de contaminante descargada por encima del límite permitido) impuesta para restringir a las fuentes puntuales que no satisfacen los límites establecidos. CPG es el costo de abatimiento de contaminante (dólares por unidad de masa de contaminante eliminado a través de la implementación de tecnología) cuando el intercambio de créditos contaminantes no es permitido, y ϕ representa el factor por el que se ha de multiplicar CPG para calcular las multas. El valor de ϕ debe ser mayor que 1, esto significa que la penalización económica (por unidad de masa) por violar una restricción es mayor que el costo de eliminar la descarga contaminante a través de la implementación de tecnologías de tratamiento. De este modo, aunque la formulación del modelo permite violaciones en las restricciones ambientales, se pretende que el valor de ϕ persuada a las fuentes contaminantes a satisfacer las regulaciones ambientales impuestas. Como se verá más adelante, el valor de ϕ en el caso de estudio es igual a 1.1.

4.2.2.2 *Penalizaciones Económicas: Alternativa 2*

Como una segunda alternativa para modelar un sistema de penalizaciones económicas se presenta el caso en el cual las multas son impuestas a una fuente contaminante como un costo fijo cuando una restricción ambiental es violada. La restricción ambiental relacionada es igual a la que se muestra en la Ecuación 4.18. Sin embargo, en este caso, se requieren dos restricciones adicionales (formulación Big-M). Estas dos restricciones se muestran en las Ecuaciones 4.24 y 4.25:

$$dif_i \leq MU \cdot w_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4.24)$$

$$dif_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4.25)$$

donde MU es un límite superior para la violación a las restricciones ambientales y establece el valor a partir del cual se deben aplicar las penalizaciones, y w_i es una variable binaria. Se debe notar que cuando una fuente puntual viola la regulación ambiental, se activa la variable binaria. El costo de las penalizaciones económicas se incorpora en el segundo término de la función objetivo como se muestra en la Ecuación 4.26:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M CTI_{ij} + \sum_{i=1}^N F_{i2} \cdot w_i \quad (4.26)$$

En este desarrollo la multa se establece si una restricción ambiental es violada, y la multa no depende de la cantidad por la cual la restricción ambiental se ha sobrepasado. F_{i2} representa el valor de la penalización económica.

En el primer planteamiento para tratar las penalizaciones económicas la multa es proporcional a la cantidad de contaminante con que se exceden los límites de las emisiones ambientales; de esta manera las fuentes puntuales enfrentan diferentes costos de penalizaciones económicas. En el segundo planteamiento las multas se imponen si las restricciones ambientales son violadas, sin importar por cuánto. Esto tiene como consecuencia que las multas aplicadas sean iguales para todas las fuentes puntuales.

4.2.3 Objetivo y Limitaciones del Modelo

Durante el desarrollo de este modelo no se proponen ni se modifican las políticas o estrategias de intercambio de créditos de contaminantes. Los programas de intercambio de créditos contaminantes se encuentran funcionando actualmente y el objetivo de este trabajo es modelar las políticas existentes y optimizar los beneficios potenciales del intercambio de créditos de contaminantes. Las siguientes son algunas limitaciones para el modelo desarrollado:

1. La determinación del *TMDL*. El límite impuesto por el *TMDL* es un parámetro de gran importancia en la estrategia de intercambio de créditos de contaminante. Sin embargo, el objetivo del modelo propuesto no es proporcionar un método para su determinación. El significado del límite *TMDL* es dado por las autoridades ambientales y su valor se define en términos de las legislaciones vigentes. Un reporte reciente (USEPA 1999) incluye una descripción exhaustiva para calcular el valor del *TMDL* y su efecto en la toma de decisiones para evaluar la calidad del agua.
2. Dinámica de los contaminantes. Los contaminantes descargados sufren una serie de transformaciones fisicoquímicas con respecto al tiempo durante su trayecto en la cuenca hidrológica, tales como dispersión, interacciones entre contaminantes o reacciones químicas ente contaminantes y cualquier material orgánico presente en el agua. Sin embargo, estas situaciones no se consideraron en el desarrollo del modelo y están fuera del alcance del modelo descrito.
3. Sustentabilidad de la cuenca hidrológica. Los modelos propuestos en este capítulo suponen un valor constante del *TMDL* y la sustentabilidad de la cuenca

hidrológica no se considera explícitamente en el modelo desarrollado. Sin embargo, el manejo sustentable de los cuerpos hidráulicos y la dinámica de los contaminantes se consideran de manera implícita en el desarrollo de las regulaciones ambientales impuestas por el estado a través del límite *TMDL*.

Capítulo 5

INCORPORACIÓN DEL ANÁLISIS DE FLUJO DE MATERIA

El presente capítulo muestra el desarrollo del modelo matemático que incorpora el análisis de flujo de materia junto con la estrategia de intercambio de créditos de contaminante para control de contaminantes en una cuenca hidrológica. El modelo determina la configuración óptima de las unidades de tratamiento de tecnología y el intercambio de créditos de contaminante, cumpliendo con las restricciones ambientales a un costo mínimo global.

5.1 INTRODUCCIÓN

El planteamiento del problema para el modelo presentado en este capítulo se puede describir como sigue. Determinar la configuración óptima para el intercambio de créditos contaminantes, y la implementación de tecnologías de tratamiento, satisfaciendo las restricciones ambientales impuestas, minimizando los costos de implementación de tecnología de manera global, para un conjunto de industrias descargando efluentes contaminados a una cuenca hidrológica que pueden participar en la estrategia de intercambio de créditos contaminantes, conociendo: el límite de descarga de contaminantes impuesto por el *TMDL*, los límites de concentración de contaminante para cada fuente puntual (*LC*), el conjunto de tecnologías disponibles para tratamiento de contaminante (que se encuentra previamente establecido), las funciones de costo para cada tecnología de tratamiento (que incluye costos fijos y costos variables), los flujos volumétricos y las concentraciones de las corrientes de entrada y salida a la cuenca hidrológica, así como las condiciones iniciales de las descargas industriales. Una industria puede comprar o vender créditos para satisfacer los límites de descarga impuestos. La función objetivo consiste en minimizar los costos asociados con la implementación de las tecnologías requeridas en la solución óptima. Como en el Capítulo anterior, se debe notar que el intercambio de créditos contaminantes no se considera en la función objetivo, debido a que el balance neto de ganancias resultantes de la compra y venta de créditos es cero (los créditos comprados por una fuente contaminante son los créditos vendidos por otra). El modelo propuesto considera que la función para calcular los costos de implementación de tecnología de tratamiento de efluentes contaminados consta de dos partes: costos fijos (independientes del flujo volumétrico) y costos variables (dependientes del flujo volumétrico tratado). El impacto ambiental de las soluciones

encontradas con el modelo se relaciona con la cantidad de contaminantes liberados después de la implementación de la estrategia de intercambio de créditos contaminantes.

La Figura 5.1 muestra una cuenca hidrológica general, en la cual la corriente principal es alimentada por diferentes tributarios. La corriente principal de la cuenca hidrológica intercambia agua durante su trayectoria. De acuerdo a su uso se pueden identificar los siguientes tipos de intercambio: agua para uso agrícola, efluentes contaminados sin tratamiento, efluentes industriales, efluentes residenciales, etc. Además el modelo toma en cuenta fenómenos naturales tales como la precipitación, la filtración y la evaporación de aguas contaminadas a lo largo de la cuenca. Estos procesos modifican significativamente la composición de los materiales transportados en el río; por lo tanto, es importante describir adecuadamente el comportamiento y composición media de los contaminantes a lo largo del río.

El río se encuentra dividido de tal manera que se considera una composición constante en cada sección (estas secciones están representadas en la Figura 5.1 con óvalos). A cada una de estas secciones se les denomina tramo, y se considera que no existen extracciones o descargas mayores de efluentes. Se considera que el flujo volumétrico y la concentración en cada tramo son diferentes entre sí, debido a las diferencias entre las corrientes de entrada y las extracciones. Los tributarios son canales o ramales de los ríos, que pueden contener descargas con o sin tratamiento, descargas industriales, descargas agrícolas, etc., y sus flujos volumétricos y concentraciones afectan los tramos en los cuales están siendo descargados.

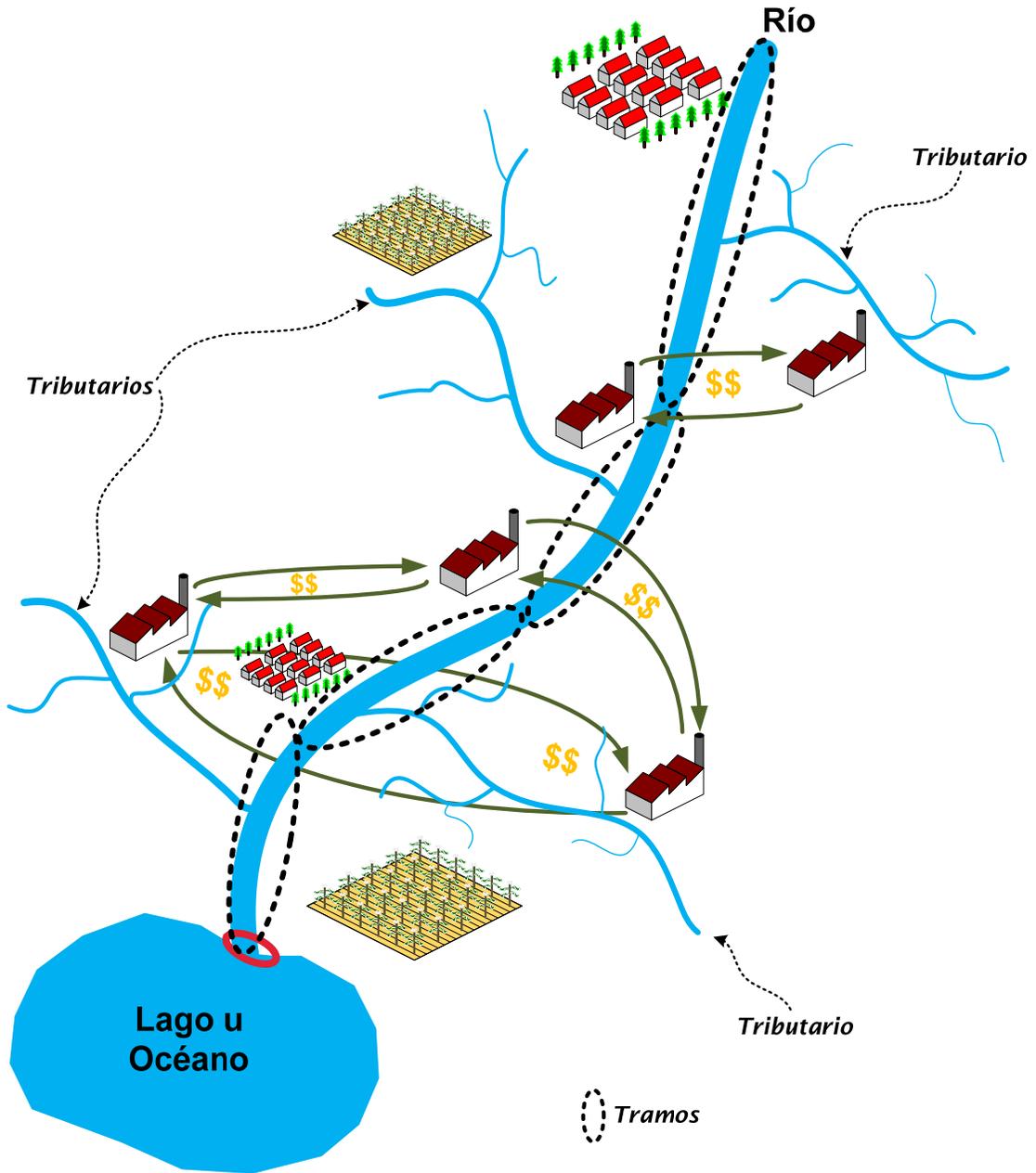


Figura 5.1 Descripción de una cuenca hidrológica y representación de la estrategia de intercambio de créditos de contaminante entre fuentes puntuales.

En la Figura 5.1 también se representa la estrategia de intercambio de créditos de contaminante; después de que el límite de descarga máxima total diaria ha sido establecido, una fuente puntual tiene dos opciones para el manejo de sus efluentes; puede implementar cualquiera de las tecnologías disponibles para tratamiento de contaminantes o comprar créditos de contaminante a otra fuente puntual. En el modelo se incorpora un término de reacción, este término toma en cuenta las posibles interacciones y reacciones químicas y bioquímicas que se pueden llevar a cabo por la flora y fauna dentro de la cuenca hidrológica, las cuales pueden descomponer o producir contaminantes.

5.2 FORMULACIÓN DEL MODELO

El subíndice relacionado con el número de tramos es r , N_r es el número total de tramos, mientras que R es el conjunto que contiene a todas las r . El subíndice t está relacionado con el número de tributario que se encuentra descargando efluentes a un tramo, N_t es el número total de tributarios y T representa su conjunto. Finalmente, j es el subíndice usado para representar las tecnologías de tratamiento disponibles para un contaminante en particular, N_j es el número total de tecnologías (incluyendo una tecnología ficticia para representar las corrientes no tratadas) y J es el conjunto correspondiente.

El modelo combina la técnica de Análisis de Flujo de Materia (usado para predecir el comportamiento de los contaminantes en la cuenca hidrológica) junto con la estrategia de intercambio de créditos contaminantes. Además, se incluye un modelo para la red de tecnologías de tratamiento de contaminantes. La formulación del modelo se describe en las siguientes subsecciones.

5.2.1 Función Objetivo

El objetivo del modelo es satisfacer las restricciones ambientales a un costo global mínimo. La Ecuación 5.1 representa la minimización del costo global de implementación de tecnología (la suma del costo de implementación de tecnología de cada fuente puntual).

$$\begin{aligned} \min \text{ COST} = & AF \cdot \sum_{r=1}^{N_r} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_j} CF_j \cdot zI_{r,t,j} + AF \cdot \sum_{r=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_j} CF_j \cdot zH_{r,j} \\ & + HY \cdot 3600 \cdot \sum_{r=1}^{N_r} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_j} CV_j \cdot fI_{r,t,j} + HY \cdot 3600 \cdot \sum_{r=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_j} CV_j \cdot fH_{r,j} \end{aligned} \quad (5.1)$$

5.2.2 Análisis de Flujo de Materia (MFA)

El Análisis de Flujo de Materia predice la trayectoria de los contaminantes descargados por las fuentes puntuales en el estado inicial del sistema, así como, el comportamiento de los contaminantes en la cuenca hidrológica una vez que la estrategia de intercambio de créditos contaminantes ha sido implementada.

5.2.2.1 Balances de masa para cada tramo

Se aplica un balance de materia para cada tramo; en este balance se establece que el flujo volumétrico que abandona cada tramo r (Q_r) es igual al flujo volumétrico que entra al mismo tramo (Q_{r-1}) más las contribuciones debidas a diversas fuentes (precipitación promedio (P_r), descargas industriales directas (D_r), descargas residenciales (H_r), suma de todos los efluentes entrando al tramo ($FT_{r,t}$)) menos las extracciones debidas a fenómenos naturales como filtraciones y evaporaciones (L_r). El modelo también considera los efluentes extraídos para usos en zonas agrícolas, residenciales o industriales (U_r).

$$Q_r = Q_{r-1} + P_r + D_r + H_r + \sum_{t=1}^{N_{t(r)}} FT_{r,t} - L_r - U_r, \quad \forall r \in R \quad (5.2)$$

En la Ecuación 5.2 $N_{t(r)}$ representa el número total de tributarios descargados al tramo r .

5.2.2.2 Balance de contaminante para cada tramo

La masa de contaminante que abandona cada tramo r ($Q_r \cdot CQ_r$) es igual a la masa de contaminante a la entrada de cada tramo ($Q_{r-1} \cdot CQ_{r-1}$) más las contribuciones debidas a la precipitación ($P_r \cdot CP_r$), a las descargas industriales ($D_r \cdot CD_r$), a las descargas residenciales ($H_r \cdot CH_r$), y a los tributarios ($FT_{r,t} \cdot CT_{r,t}$); menos las pérdidas ($L_r \cdot CL_r$), usos ($U_r \cdot CU_r$) y la masa de contaminante descompuesta por las reacciones químicas que se llevan a cabo en

esa sección del río $\left(\int_{V=0}^{V_r} r_r dV_r \right)$.

El término de reacción considera las reacciones químicas y bioquímicas que se llevan a cabo en el río por la flora y fauna debido a la interacción del contaminante y el sistema. Por lo tanto, el balance por contaminante está representado por la Ecuación 5.3.

$$Q_r \cdot CQ_r = Q_{r-1} \cdot CQ_{r-1} + P_r \cdot CP_r + D_r \cdot CD_r + H_r \cdot CH_r + \sum_{t=1}^{N_t} FT_{r,t} \cdot CT_{r,t} - L_r \cdot CL_r - U_r \cdot CU_r - \int_{V=0}^{V_r} r_r \cdot dV_r, \quad \forall r \in R \quad (5.3)$$

5.2.2.3 Balance de masa para los tributarios

El balance global para el tributario t determina que el flujo volumétrico total descargado por parte del tributario t al tramo r ($FT_{r,t}$) es igual a la suma las descargas sin tratamiento

$(SU_{r,t})$, las descargas con tratamiento $(ST_{r,t})$, las descargas industriales $(I_{r,t})$, las descargas pluviales $(P_{r,t})$ y las descargas directas $(D_{r,t})$; menos las pérdidas $(L_{r,t})$ y usos o extracciones de agua $(U_{r,t})$:

$$FT_{r,t} = SU_{r,t} + ST_{r,t} + I_{r,t} + P_{r,t} + D_{r,t} - L_{r,t} - U_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5.4)$$

5.2.2.4 Balance por contaminante para los tributarios

La masa de contaminante descargada por cada tributario t al tramo r se calcula a partir de la Ecuación 5.5. Esta Ecuación incluye un término para las reacciones que se pueden llevar a cabo dentro del tributario.

$$FT_{r,t} \cdot CT_{r,t} = SU_{r,t} \cdot CSU_{r,t} + ST_{r,t} \cdot CST_{r,t} + I_{r,t} \cdot CI_{r,t} + P_{r,t} \cdot CP_{r,t} + D_{r,t} \cdot CD_{r,t} - L_{r,t} \cdot CL_{r,t} - U_{r,t} \cdot CU_{r,t} - \int_{V=0}^{V_{r,t}} r_{r,t} dV_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5.5)$$

5.2.2.5 Términos para las reacciones químicas

Las reacciones químicas llevadas a cabo en las cuencas hidrológicas tienen grandes efectos en la composición de los contaminantes a lo largo del trayecto del río. La concentración de diversos contaminantes puede disminuir debido a la degradación natural de los mismos en la cuenca hidrológica. Las Ecuaciones 5.6 y 5.7 consideran una cinética lineal para las concentraciones de contaminante en los tramos y tributarios respectivamente.

$$\int_{V=0}^{V_r} r_r dV_r = k_r \cdot CQ_r \cdot V_r, \quad \forall r \in R \quad (5.6)$$

$$\int_{V=0}^{V_{r,t}} r_{r,t} dV_{r,t} = k_{r,t} \cdot CT_{r,t} \cdot V_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5.7)$$

5.2.2.6 Descargas agrícolas y usos del agua

El flujo del drenaje agrícola es proporcional al área irrigada por el tributario, esto se calcula mediante la siguiente expresión:

$$D_{r,t} = \alpha_{r,t} \cdot A_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T$$

donde $\alpha_{r,t}$ es la velocidad de drenado ($m^3 / acre \cdot s$) y $A_{r,t}$ es el área irrigada por el tributario t (*acres*). De manera similar, la expresión para el uso de agua se muestra a continuación:

$$U_{r,t} = \beta_{r,t} \cdot A_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T$$

donde $\beta_{r,t}$ es el uso de agua en el t -ésimo tributario ($m^3 / acre \cdot s$).

5.2.3 Modelo para la red de tecnologías de tratamiento

Se considera que existe un conjunto de tecnologías de tratamiento disponibles para satisfacer los límites de descarga de cada fuente puntual. El volumen descargado por una fuente puntual se puede tratar por una o diversas tecnologías capaces de remover contaminante (véase la Figura 5.2).

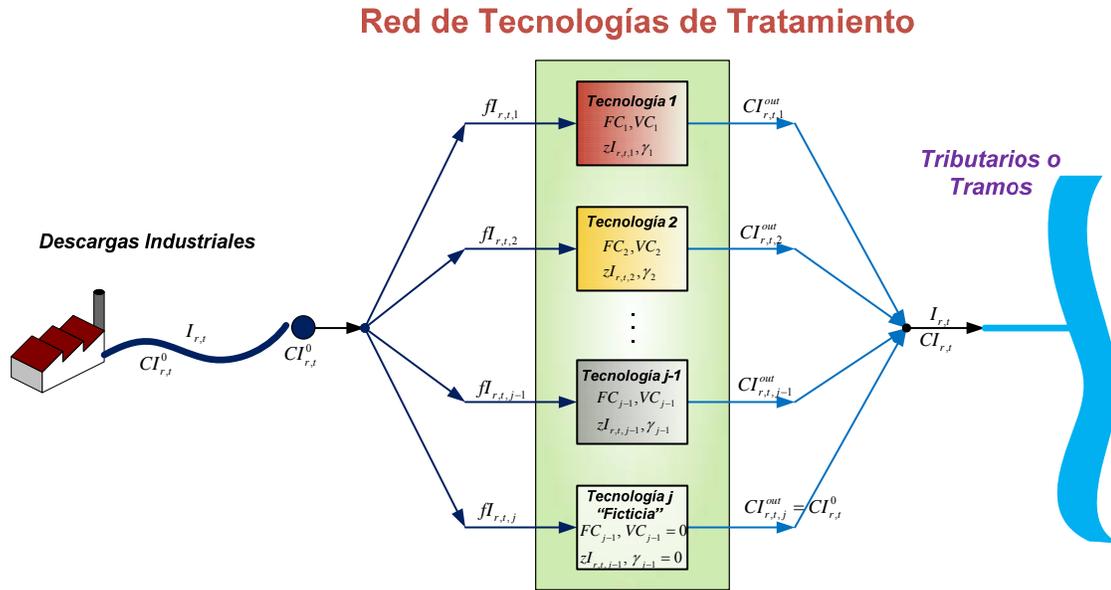


Figura 5.2 Red de tecnologías de tratamiento.

Se consideran las siguientes suposiciones en la formulación del modelo:

- La red de tecnologías de tratamiento considera las diversas tecnologías disponibles para remover el contaminante presente en las corrientes de desecho de las fuentes puntuales.
- Cada tecnología de tratamiento j tiene asociado un factor de eficiencia para remover contaminante (γ_j). Previo al proceso de optimización, cada unidad de tratamiento puede ser simulada (usando algún simulador de procesos) para determinar los factores de eficiencia. Además, la función de costo para cada unidad incluye un costo fijo (CF_j) y un costo variable (CV_j). Se utilizan las siguientes relaciones para determinar la concentración a la salida de cada unidad de tratamiento, donde la cantidad de contaminante removido está relacionado de manera lineal con el factor de eficiencia:

$$CI_{r,t,j}^{out} = CI_{r,t}^0 \cdot (1 - \gamma_j), \quad \forall r \in R, t \in T$$

$$CH_{r,j}^{out} = CH_r^0 \cdot (1 - \gamma_j), \quad \forall r \in R$$

- Todos los términos presentes en las relaciones previas son parámetros conocidos; por lo tanto, todas las concentraciones de salida para las unidades de tratamiento están dadas en términos de las concentraciones de entrada y los factores de eficiencia.
- Se incluye una tecnología de tratamiento ficticia (con factor de eficiencia y costo asociado iguales a cero) para modelar las derivaciones de corrientes sin tratar.

Las corrientes de fuentes puntuales que se pueden considerar para participar en el proceso de intercambio de créditos de contaminante son los efluentes industriales descargados en los tributarios ($I_{r,t}$), y los efluentes industriales descargados en los tramos (H_r). Se supone que todos los flujos son parámetros conocidos, mientras que las concentraciones asociadas con las descargas de las fuentes puntuales son consideradas como variables. El control de la calidad del agua en cuencas hidrológicas requiere el establecimiento de un límite de descarga por parte de las autoridades, como por ejemplo el límite de descarga máxima total diaria (*TMDL*). Después de que el límite (*TMDL*) se ha establecido, se asigna un límite de descarga a cada fuente puntual. Este límite define al parámetro *LC*, que representa el límite de concentración de contaminante para las descargas de todas las fuentes puntuales (masa/volumen). En este caso, el cálculo de *LC* se hace con base en el límite impuesto por el *TMDL* y representa la relación entre la cantidad total de contaminante que una cuenca hidrológica puede recibir sin sufrir daños ambientales y el flujo volumétrico total descargado por todas las fuentes puntuales al río. *LC* se obtiene a través de la Ecuación 5.8:

$$LC = \frac{TMDL}{TVD} \quad (5.8)$$

donde TVD es el volumen total de descargas de todas las fuentes contaminantes, y se calcula a partir de la Ecuación 5.9:

$$TVD = \sum_{r=1}^{N_r} \left(P_r + D_r + H_r + \sum_{t=1}^{N_t} (SU_{r,t} + ST_{r,t} + I_{r,t} + D_{r,t}) \right) + Q_0 \quad (5.9)$$

En la Ecuación 5.9 Q_0 representa el flujo volumétrico inicial entrante a la cuenca hidrológica.

Después del cálculo del valor de LC , la cantidad de reducción de contaminante, además de las descargas contaminantes, su ubicación y su participación en el mercado de intercambio de créditos contaminantes se deben identificar. Los balances para la red de tecnologías de tratamiento de efluentes industriales descargando a los tributarios se presentan a continuación:

$$I_{r,t} = \sum_{j=1}^{N_j} fI_{r,t,j}, \quad \forall r \in R, t \in T, CI_{r,t}^0 \geq LC \quad (5.10)$$

$$CI_{r,t} \cdot I_{r,t} = \sum_{j=1}^{N_j} fI_{r,t,j} \cdot CI_{r,t,j}^{out}, \quad \forall r \in R, t \in T, CI_{r,t}^0 \geq LC \quad (5.11)$$

$$CI_{r,t} = CI_{r,t}^0, \quad \forall r \in R, t \in T, CI_{r,t}^0 < LC \quad (5.12)$$

donde $fI_{r,t,j}$ es el flujo volumétrico segregado a la tecnología de tratamiento j -ésima. Las Ecuaciones 5.10, 5.11 y 5.12 representan disyunciones, en las cuales las tecnologías de tratamiento se implementan si las concentraciones de las emisiones de las fuentes puntuales son mayores al límite establecido, y no se implementan en caso contrario.

La existencia (o inexistencia) de las tecnologías de tratamiento en términos de la variable binaria $zI_{r,t,j}$ están representados a través de la reformulación Big-M en las Ecuaciones 5.13 y 5.14.

$$fI_{r,t,j} \geq \delta \cdot zI_{r,t,j}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5.13)$$

$$fI_{r,t,j} \leq I_{r,t} \cdot zI_{r,t,j}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5.14)$$

donde δ es un parámetro pequeño usado para propósitos de modelado, y $zI_{r,t,j}$ es una variable binaria asociada con la existencia de la tecnología de tratamiento j en la fuente puntual $I_{r,t}$. Se debe notar que $I_{r,t}$ representa un límite superior para $fI_{r,t,j}$.

Se requieren expresiones análogas para las descargas industriales en los tramos H_r :

$$H_r = \sum_{j=1}^{N_j} fH_{r,j}, \quad \forall r \in R, CH_r^0 \geq LC \quad (5.15)$$

$$CH_r \cdot H_r = \sum_{j=1}^{N_j} fH_{r,j} \cdot CH_{r,j}^{out}, \quad \forall r \in R, CH_r^0 \geq LC \quad (5.16)$$

$$CH_r = CH_r^0, \quad \forall r \in R, CH_r^0 < LC \quad (5.17)$$

$$fH_{r,j} \geq \delta \cdot zH_{r,j}, \quad \forall r \in R \quad (5.18)$$

$$fH_{r,j} \leq fH_{r,j} \cdot zH_{r,j}, \quad \forall r \in R \quad (5.19)$$

5.2.4 Intercambio de créditos de contaminante

Antes de implementar esta estrategia se debe establecer un estándar de calidad ambiental e identificar las fuentes contaminantes, su localización y la cantidad de contaminante que cada una debe reducir. Para esta formulación sólo se considera la participación de fuentes contaminantes puntuales en el intercambio de créditos contaminantes. Para los tramos, las fuentes puntuales consideradas son todas las H_r , y para los tributarios son todas las $I_{r,t}$.

5.2.4.1 Mercado para el intercambio de créditos contaminantes

Las concentraciones de las fuentes puntuales se pueden comparar con el límite de concentración de contaminante para las fuentes puntuales LC . Si la concentración de una fuente puntual es menor al límite de concentración establecido previamente por el $TMDL$, esta fuente puntual no puede participar en el mercado de intercambio de créditos de contaminante. Por lo tanto, sus descargas de contaminante inicial y final serán las mismas. Para todas las fuentes puntuales que se encuentren en esta situación no será necesario controlar sus emisiones. Por otra parte, aquellas fuentes puntuales con concentraciones de descarga mayores a LC tendrán dos opciones para reducir sus emisiones, implementar alguna tecnología de tratamiento o comprar créditos a otra fuente puntual. Las restricciones ambientales para procesos de intercambio de créditos contaminantes para $I_{r,t}$ y H_r se representan en las Ecuaciones 5.20 y 5.21:

$$I_{r,t} \cdot LC \geq I_{r,t} \cdot CI_{r,t} - \frac{1}{TR} \cdot C_{purch} I_{r,t} + C_{sold} I_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5.20)$$

$$H_r \cdot LC \geq H_r \cdot CH_r - \frac{1}{TR} \cdot C_{purch} H_r + C_{sold} H_r, \quad \forall r \in R \quad (5.21)$$

donde TR es la relación de intercambio y representa cuántos créditos debe comprar una fuente puntual para disminuir sus emisiones contaminantes en una unidad; $CpurchI_{r,t}$ es la cantidad total de créditos comprados por la fuente puntual $I_{r,t}$; $CsoldI_{r,t}$ es la cantidad total de créditos vendidos por la fuente puntual $I_{r,t}$, $CpurchH_r$ es la cantidad total de créditos comprados por la fuente puntual H_r y $CsoldH_r$ es la cantidad total de créditos vendidos por la fuente puntual H_r .

Por otra parte, el modelo debe considerar el intercambio de créditos entre las distintas fuentes puntuales. La Ecuación 5.22 establece que cualquier fuente puntual descargando contaminantes en un tributario r, t ($I_{r,t}$) puede comprar créditos contaminantes de otras fuentes descargando en el tramo r (H_r) y a otras fuentes puntuales descargando en el tributario r, t ($I_{r,t}$). Esto está representado por el primero y segundo términos del lado derecho de la ecuación respectivamente. La Ecuación 5.23 establece que cualquier fuente puntual descargando contaminantes en el tramo r (H_r) puede comprar créditos de otras fuentes puntuales descargando en un tramo r (H_r) o de otras fuentes puntuales descargando contaminantes en un tributario r, t ($I_{r,t}$).

La cantidad total de créditos comprados por una fuente puntual se calcula a partir de las Ecuaciones 5.22 y 5.23:

$$CpurchI_{r,t} = \sum_{r^* \in R} CCIH_{r,t,r^*} + \sum_{r^* \in R, r^* \neq r} \sum_{t^* \in T, t^* \neq t} CCI_{r,t,r^*,t^*}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5.22)$$

$$C_{purch}H_r = \sum_{r^* \in R, r^* \neq r}^{N_r} CCH_{r,r^*} + \sum_{r^* \in R} \sum_{t^* \in T}^{N_t} CCHI_{r,r^*,t^*}, \quad \forall r \in R \quad (5.23)$$

De manera similar, para el cálculo del total de los créditos vendidos se utilizan las Ecuaciones 5.24 y 5.25:

$$C_{sold}I_{r,t} = \sum_{r^* \in R}^{N_r} CCHI_{r^*,r,t} + \sum_{r^* \in R, r^* \neq r} \sum_{t^* \in T, t^* \neq t}^{N_t} CCI_{r^*,t^*,r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5.24)$$

$$C_{sold}H_r = \sum_{r^* \in R, r^* \neq r}^{N_r} CCH_{r^*,r} + \sum_{r^* \in R} \sum_{t^* \in T}^{N_t} CCIH_{r^*,t^*,r}, \quad \forall r \in R \quad (5.25)$$

En las Ecuaciones anteriores r^* y t^* se refieren a los elementos de los conjuntos R y T ; sin embargo, esta representación es útil para indicar que ninguna fuente puntual puede comprar o venderse créditos a sí misma, y las Ecuaciones 5.26 y 5.27 evitan el intercambio de créditos de contaminante entre una misma fuente puntual.

$$CCI_{r,t,r,t} = 0 \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5.26)$$

$$CCH_{r,r} = 0 \quad \forall r \in R \quad (5.27)$$

Existe una política que permite que a lo más ocurra un intercambio entre cada posible par de fuentes puntuales. Las Ecuaciones 5.28 y 5.29 representan la reformulación Big-M para los créditos comprados y vendidos en términos de las variables binarias para $I_{r,t}$:

$$C_{sold}I_{r,t} \leq M \cdot y_{s}I_{r,t} \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5.28)$$

$$C_{purch}I_{r,t} \leq M \cdot y_{p}I_{r,t} \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5.29)$$

Se requieren expresiones análogas para H_r :

$$C_{sold}H_r \leq M \cdot y_s H_r \quad \forall r \in R \quad (5.30)$$

$$C_{purch}H_r \leq M \cdot y_p H_r \quad \forall r \in R \quad (5.31)$$

La Ecuación 5.33 excluye la posibilidad de que una fuente puntual pueda comprar o vender créditos de manera simultánea. La Ecuación 5.32 evita la posibilidad de comprar o vender créditos si la descarga de la fuente puntual antes de la implementación de tecnología es menor que los límites permitidos.

$$y_p I_{r,t} + y_s I_{r,t} = 0 \quad \forall r \in R, t \in T, CI_{r,t}^0 \leq LC \quad (5.32)$$

$$y_p I_{r,t} + y_s I_{r,t} \leq 1 \quad \forall r \in R, t \in T, CI_{r,t}^0 \geq LC \quad (5.33)$$

Se requieren restricciones similares para H_r :

$$y_p H_r + y_s H_r = 0 \quad \forall r \in R, CI_{r,t}^0 \leq LC \quad (5.34)$$

$$y_p H_r + y_s H_r \leq 1 \quad \forall r \in R, CI_{r,t}^0 \geq LC \quad (5.35)$$

Capítulo 6

CASOS DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan dos casos de estudio para evaluar el desempeño y los alcances de los modelos propuestos. En ambos casos de estudio se comparan los resultados cuando la contaminación se controla únicamente a través de la implementación de tecnología (como se haría normalmente en políticas de comando-control) y cuando se ha implementado la estrategia de intercambio de créditos de contaminante.

6.1 CASO DE ESTUDIO 1. MODELO BASE.

Para evaluar el desempeño del modelo y las extensiones propuestas, se presenta una versión modificada del caso de estudio para intercambio de créditos de mercurio usado por Shastri y col. (2005). En este ejemplo el límite de descarga másica anual de mercurio se establece como 1.1209 kg/año (TMDL); el límite de concentración de las descargas, LC , es igual a 2.3 ng/l. La descarga másica de mercurio permitida para cada fuente i es el producto de LC (2.3 ng/l) y el flujo de diseño. La Tabla 6.1 muestra los parámetros para cada fuente i en el caso de estudio.

6.1.1 Reducción de contaminantes.

Se consideran tres diferentes tecnologías de tratamiento, y se supone que estas tecnologías están disponibles para cualquier fuente puntual. Por simplicidad, los requerimientos de capital y la capacidad de reducción de contaminante de estas tecnologías se relacionan linealmente con el volumen de descarga. El costo total de planta incluye costo de capital, costos de mantenimiento y costos de operación por unidad de volumen de descarga a tratar. La Tabla 6.2 muestra los datos de los parámetros para las tecnologías disponibles.

6.1.2 Parámetros para el intercambio de créditos

Algunos de los parámetros que deben ser establecidos para el intercambio de créditos son la relación de intercambio r , y el costo del intercambio de créditos PC . El valor de la relación de intercambio normalmente es mayor que 1, lo cual implica que el comprador de créditos adquiera más unidades de reducción que aquellas que necesitaría cubrir mediante

Tabla 6.1 Datos para cada fuente *i* . Caso de estudio 1.

Fuente Puntual	Descarga Volumétrica x 10 ⁶ (l/año)	Concentración de las descargas (ng/l)	Reducción deseada (g/año)
1	63688.3025	4.65	149.6675
2	2072.2875	3.70	2.9012
3	6355.0150	4.30	12.7100
4	2072.2875	3.40	2.2795
5	2763.0500	3.88	4.3656
6	3094.6160	3.70	4.3325
7	1657.8300	3.90	2.6525
8	37301.1750	4.83	94.3720
9	6216.8625	4.00	10.5687
10	1381.5250	3.10	1.1052
11	1381.5250	3.06	1.0500
12	1381.5250	3.22	1.2710
13	2763.0500	3.31	2.7907
14	5201.4416	4.80	13.0036
15	24867.4500	4.33	50.4809
16	9946.9800	5.10	27.8515
17	80957.3650	4.87	208.0604
18	31775.0750	4.52	70.5407
19	1591.5168	5.05	4.3767
20	500.1121	4.14	0.9202
21	149204.7000	4.58	340.1867
22	6465.5370	5.20	18.7501
23	38807.0373	4.41	81.8828
24	2653.9095	3.90	4.2463
25	751.5496	4.50	1.6534
26	690.7625	3.95	1.1398
27	4.1446	3.72	0.0059
28	1721.3802	4.10	3.0985
29	74.6024	3.40	0.0821

implementación de tecnología, para incluir un margen de seguridad en el intercambio de créditos. Esto se hace para incluir incertidumbres en el nivel de control necesario para

satisfacer los estándares de calidad ambiental y para amortiguar los efectos de la contaminación en caso de que la implementación del intercambio de créditos contaminantes resulte menos efectiva que lo esperado. Para el caso de estudio la relación de intercambio r es igual a 1.1, aunque este valor se fija de acuerdo al tipo de contaminante que se esté tratando y las facilidades que se quieran dar a las fuentes puntuales para participar en el mercado de créditos contaminantes. El costo de transacción debe estar en el intervalo del costo de tratamiento de contaminante por kg, y para el caso de estudio PC es igual a $\$1.5 \times 10^6/\text{kg}$.

Tabla 6.2 Datos para las diferentes tecnologías de tratamiento. Caso de Estudio 1.

Proceso	Capacidad de reducción de mercurio (ng/l)	Requerimiento de capital ($\$/1000 \text{ m}^3$)
Adsorción por carbón activado (A)	3.0	396.3012
Coagulación y filtración (B)	2.0	264.2008
Intercambio de iones (C)	1.0	158.5205

6.1.3 Resultados y análisis

Al análisis cuando las zonas geográficas y el sistema de penalización no se consideran se le denomina “Solución Caso Base”. Al análisis en el que se consideran zonas geográficas pero el sistema de penalizaciones económicas no se ha implementado, se le nombra “Solución Zonas”. Finalmente a las soluciones que consideran penalizaciones económicas pero no consideran zonas geográficas se denominan “Solución Multas 1” (Ecuaciones 4.2-4.16 y 4.18-4.23) y “Solución Multas 2” (Ecuaciones 4.2-4.16 y 4.24-4.26). Por último al análisis cuando la reducción de la contaminación se lleva a cabo a través de la implementación de

tecnología sin utilizar la estrategia de intercambio de créditos contaminantes, se le denomina “Solución de Implementación de Tecnología”.

Para el caso de estudio se incluye una comparación entre las diferentes soluciones: a) Solución Caso Base b) Solución Zonas, c) Solución Multas 1, d) Solución Multas 2. También se incluye un análisis de la comparación entre los diferentes valores del factor ambiental límite (*SF*). Las Tablas 6.3 y 6.4 muestran los resultados obtenidos para el caso de estudio cuando el TMDL es igual a 2.3 ng/l.

Tabla 6.3 Resultados para el Caso de Estudio 1

	Función Objetivo 10 ⁶ (\$)	Unidades implementadas Tecnología A	Unidades implementadas Tecnología B	Unidades implementadas Tecnología C	Total	
Implementación de Tecnología	187.837	12	14	3	29	
Caso Base	148.475	12	17	0	29	
Multas 1	148.475	12	17	0	29	
Multas 2	147.536	7	16	0	23	
	SF=1.35	148.475	12	17	0	29
	SF=1.30	148.475	12	17	0	29
Solución Zonas	SF=1.25	148.475	12	17	0	29
	SF=1.20	148.475	12	17	0	29
	SF=1.05	148.556	7	16	0	23

El valor de la función objetivo en la ‘Solución de Implementación de Tecnología’ es de 187.837 millones de dólares. Esta es la solución cuando el intercambio de créditos de contaminantes no es posible, el control de la contaminación se logra únicamente a través de la implementación de tecnología, y en total se instalan 29 plantas de tratamiento. Si comparamos el valor de la función objetivo de esta solución con las configuraciones del resto de las soluciones, en las cuales el intercambio de créditos es posible, la diferencia promedio

es de 39.47 millones de dólares. En promedio la configuración encontrada en Solución de Implementación de Tecnologías es un 26 % más costosa que el resto de las soluciones. Es preciso mencionar que bajo esta configuración la emisión total de contaminantes es de 816.13 g/año, mientras que en las otras soluciones el promedio de emisión de contaminante es de 1116.84 g/año.

Tabla 6.4 Resultados para descarga anual de mercurio. Caso de Estudio 1.

		Descarga total de Mercurio (g/año)
<u>Implementación de Tecnología</u>		816.13
Caso Base		1113.28
Multas 1		1113.28
Multas 2		1142.34
Solución Zonas	SF=1.35	1113.28
	SF=1.30	1113.28
	SF=1.25	1113.28
	SF=1.20	1113.28
	SF=1.05	1112.66

En las Figuras 6.1 a 6.6 se presenta la descarga de mercurio acumulada para cada fuente puntual (las fuentes puntuales se numeran de aguas arriba a aguas abajo). El gráfico de descarga acumulada implica la adición sucesiva de las descargas permitidas o de las descargas actuales de cada fuente contaminante. Cada gráfico presenta seis curvas. La línea continua de color rojo (curva superior en todos los casos) representa el caso límite usado para determinar cuando una emisión contaminante se vuelve un punto caliente ('hotspot'). Esta línea se obtiene multiplicando SF por el límite de descarga másica permitida para cada fuente puntual. Por otra parte, la curva inferior de color verde, en todos los gráficos representa la descarga acumulada de mercurio cuando no existe intercambio de créditos de contaminante;

es decir, cuando el control de la contaminación se lleva a cabo únicamente a través de la implementación de tecnología en todas las fuentes puntuales (este es el mejor escenario en términos de impacto ambiental, pero no es el mejor escenario en términos económicos). El resto de las curvas en las Figuras 6.1 a 6.6 (localizadas entre los límites descritos previamente) muestra la descarga de contaminante acumulada lograda mediante las cuatro diferentes soluciones propuestas en este trabajo. Las Figuras 6.1 a 6.6 difieren en el valor de SF utilizado, variando desde 1.05 hasta 1.35. El límite de concentración dado por el TMDL es igual a 2.3 ng por litro para todas las fuentes.

Nótese que en las Figuras 6.1 a 6.4 la diferencia entre las descargas permitidas y las descargas después del mercadeo de contaminantes siempre es positiva. Esto implica que cualquier solución provee una estructura de implementación de tecnología con la cual las restricciones ambientales no son violadas, en estos casos ninguna fuente puntual crea puntos con alta concentración de contaminante. Sin embargo, cuando el valor de SF disminuye y se aproxima a 1, la solución obtenida por el caso base puede violar las restricciones ambientales, creando puntos calientes, o descargas contaminantes mayores que las permitidas en puntos localizados. La Figura 6.5 muestra que cuando SF es igual a 1.10, las descargas óptimas obtenidas para las fuentes puntuales PS_1 a PS_5 crean puntos calientes en las soluciones del caso base, multas 1 y multas 2.

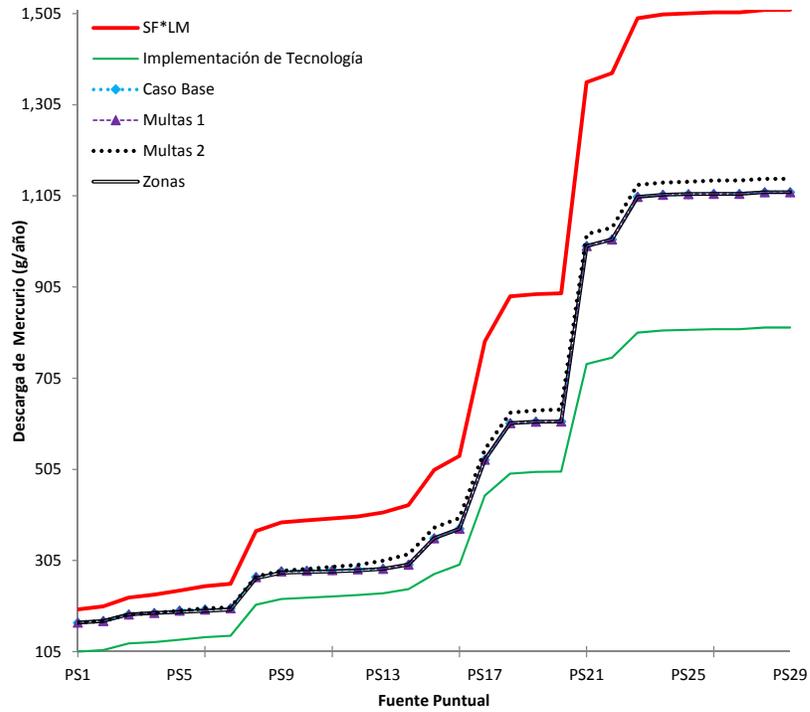


Figura 6.1 Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.35$

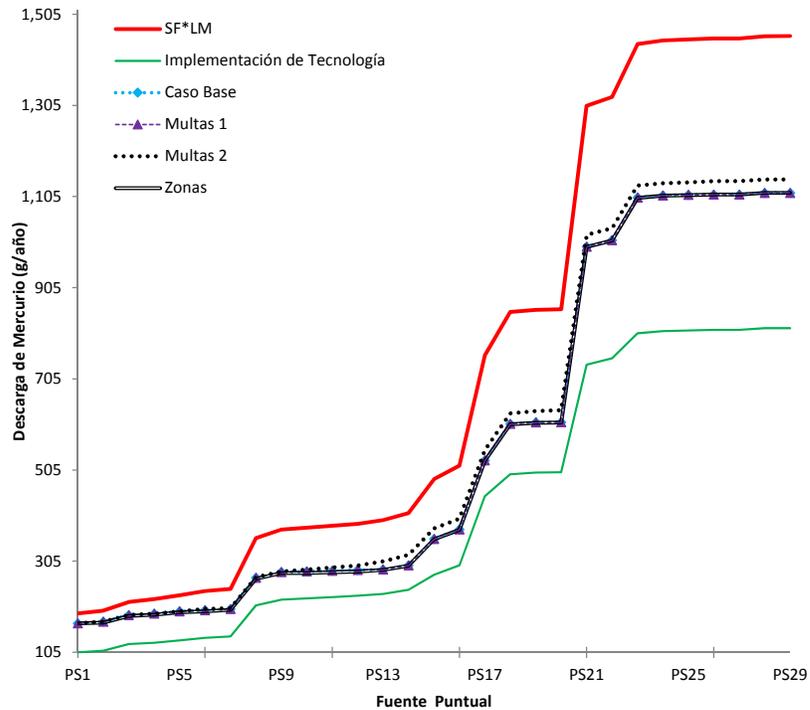


Figura 6.2 Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.30$

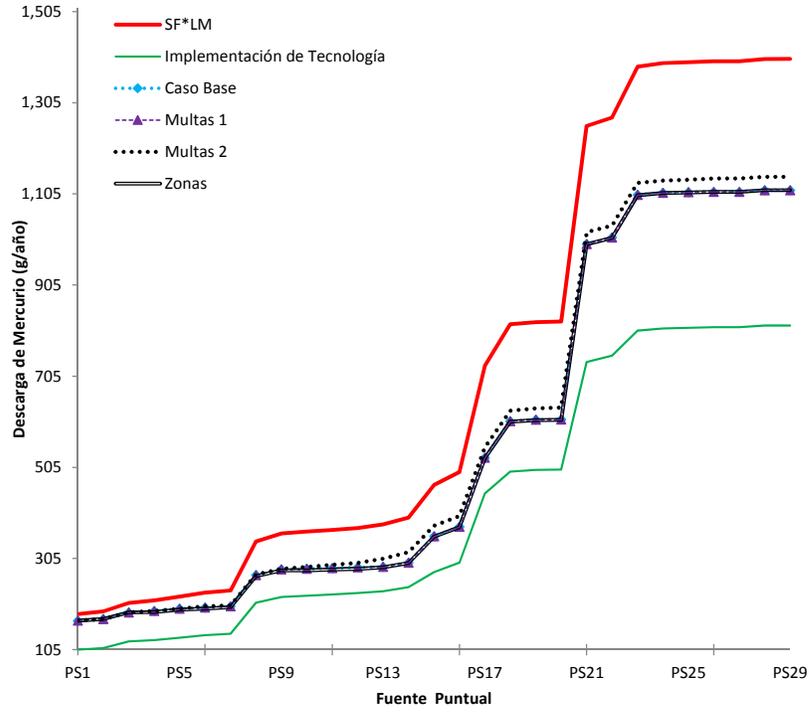


Figura 6.3 Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.25$

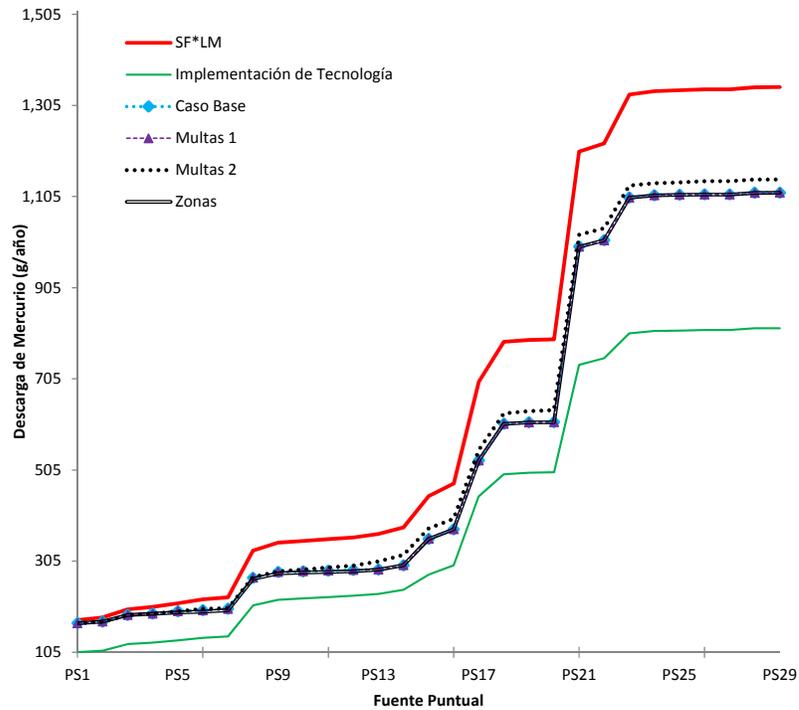


Figura 6.4 Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.20$

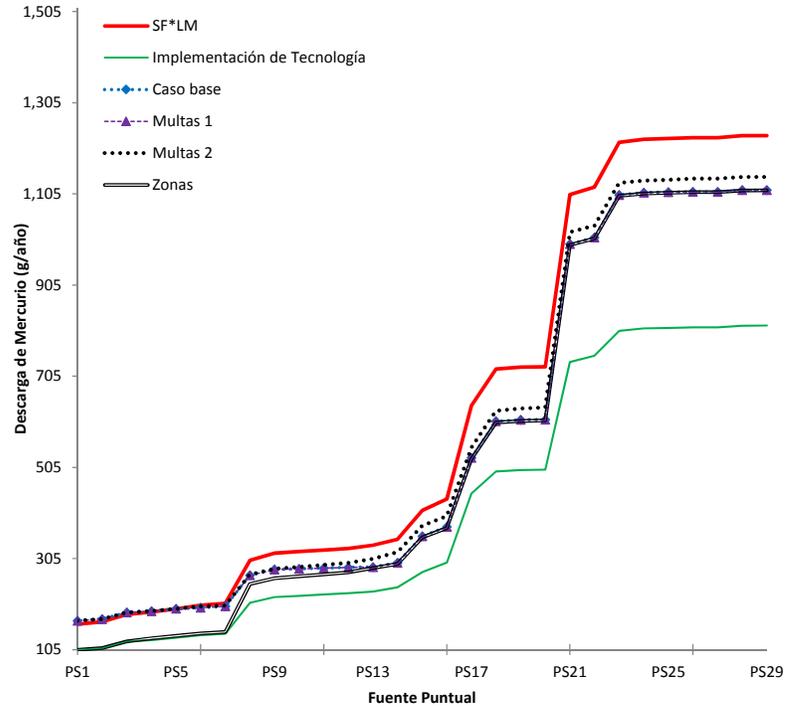


Figura 6.5 Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.10$

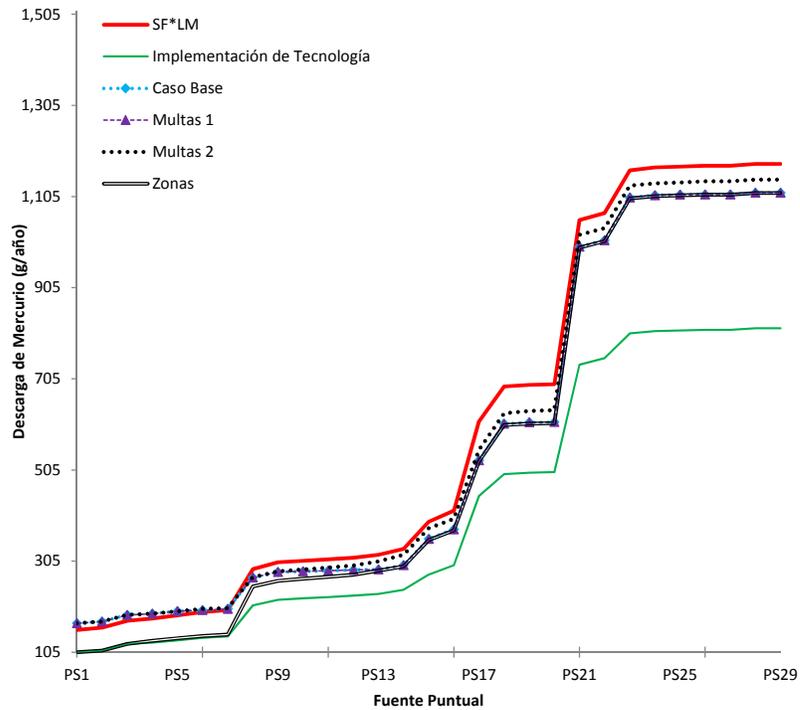


Figura 6.6 Descarga de contaminantes acumulada (g/año) en cada fuente puntual i cuando $SF = 1.05$

De manera similar, en la Figura 6.6, las fuentes puntuales de PS_1 a PS_7 crean puntos calientes cuando se implementan las configuraciones óptimas de instalación de tecnología obtenidas en las soluciones del caso base, multas 1 y multas 2. Esta situación se evita en la solución zonas mediante la adición de la restricción ambiental mostrada en la Ecuación 4.17.

En general, las emisiones contaminantes después del intercambio de créditos cuando se incluye la restricción para zonas geográficas (solución zonas) son menores que aquellas obtenidas en el resto de las configuraciones. Desde un punto de vista ambiental, se podría decir que esta configuración (implementación de tecnología más intercambio óptimo en la solución con zonas geográficas) es mejor que las soluciones que incorporan penalizaciones económicas.

La presencia de penalizaciones económicas indica que las condiciones ambientales globales no se están cumpliendo, y algunas fuentes puntuales encuentran más conveniente pagar multas que instalar tecnología. También se debe notar que de acuerdo a la Ecuación 4.23, una multa es equivalente a ϕ (1.1) veces el valor de los costos de reducción totales por gramo cuando no se permite el intercambio de créditos de contaminante. Este parámetro se puede modificar asignándole valores más altos. Cuando incrementa el valor de F_i , el valor de la función objetivo también incrementa. Lo mismo pasa con las Ecuaciones 4.24 a 4.26. Las emisiones de contaminante en la solución multas 2 en casi todos los casos son mayores a las emisiones obtenidas en la solución multas 1. Esto indica que los parámetros usados en la formulación del modelo multas 1 son más efectivos para controlar las emisiones contaminantes. Aunque siempre es deseable satisfacer las restricciones ambientales, un sistema de implementación de penalizaciones económicas, como los descritos en este trabajo

puede ser usado por autoridades, grupos ambientalistas y quienes toman decisiones en las empresas para tomar diferentes acciones, por ejemplo para estimar el valor apropiado para las penalizaciones. Las penalizaciones cobradas por las autoridades ambientales podrían ser usadas para recompensar a las fuentes puntuales que reducen sus emisiones por debajo de los límites establecidos, o para instalar plantas de tratamiento de contaminantes en lugares estratégicos para satisfacer las regulaciones ambientales en los ríos.

En la Figura 6.7 se muestra la configuración óptima obtenida mediante la formulación presentada en este trabajo cuando el control de la contaminación se lleva a cabo únicamente a través de la implementación de tecnología. La configuración mostrada corresponde al caso en el cual el intercambio de créditos no está permitido.

La Tabla 6.5 muestra el resumen de las configuraciones óptimas obtenidas por las formulaciones descritas en el Capítulo 4, y la Tabla 6.6 proporciona los intercambios de contaminante óptimos obtenidos con la formulación del caso base, y con la formulación que evita la creación de puntos calientes con un valor de $SF = 1.05$ (modelo con zonas geográficas); se debe observar que cuando el intercambio de créditos es implementado, todas las fuentes puntuales (a excepción de la fuente puntual 3) participan en el intercambio de créditos (ya sea comprando o vendiendo créditos).

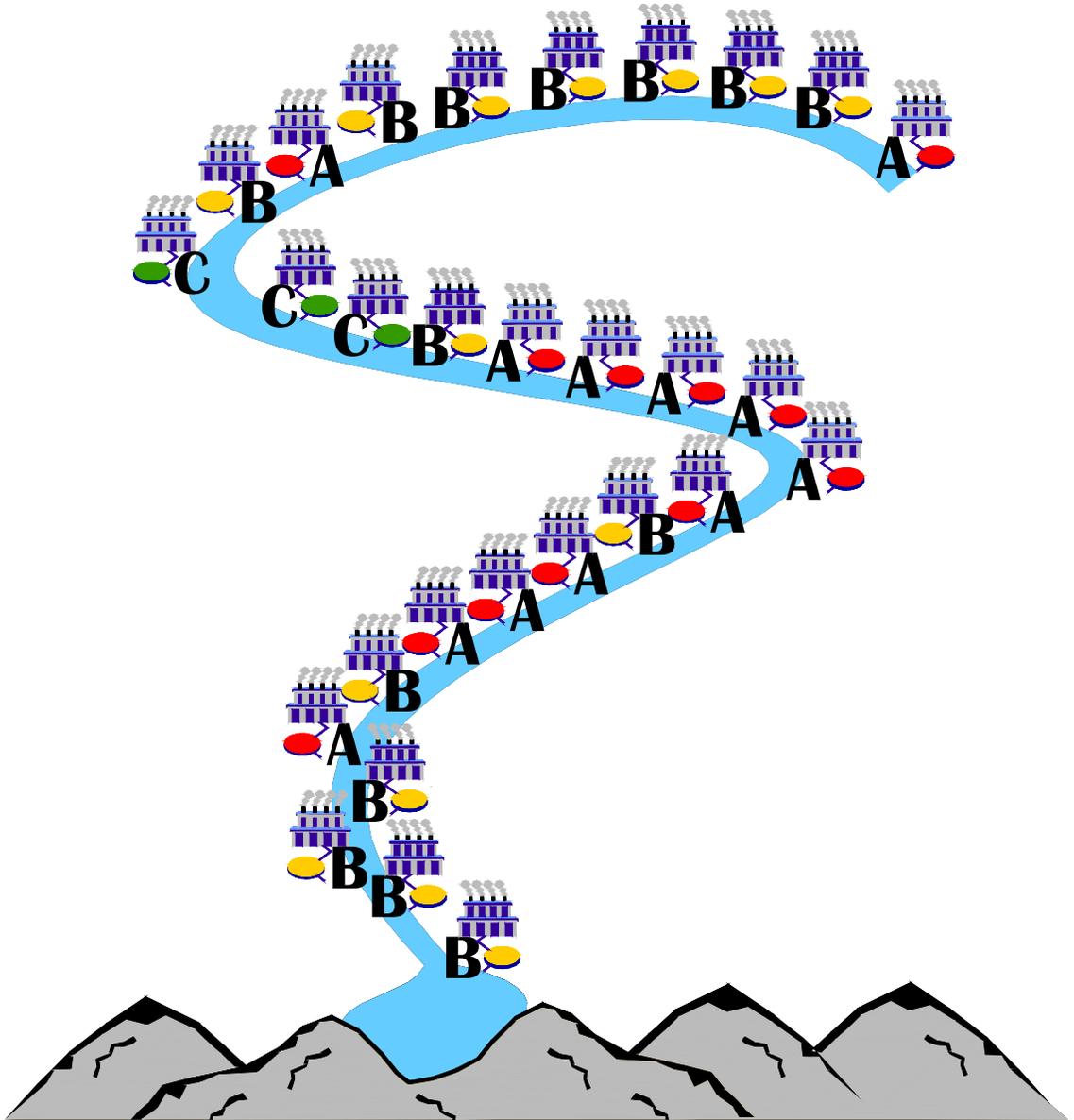


Figura 6.7 Configuración óptima de la solución de implementación de tecnología

Tabla 6.5 Resultados de las configuraciones óptimas de implementación de tecnología.

Caso de Estudio 1.

PS	Implementación de tecnología	Caso Base	Multas 1	Multas 2	Solución Zonas SF=				
					1.35	1.30	1.25	1.20	1.05
1	A	B	B	B	B	B	B	B	A
2	B	B	B	B	B	A	B	B	B
3	B	B	B	B	B	B	B	B	B
4	B	B	B	B	B	B	A	B	----
5	B	B	B	B	A	B	B	A	B
6	B	A	A	B	A	A	A	A	B
7	B	B	B	A	B	B	B	B	B
8	A	A	A	A	A	A	A	A	B
9	B	B	B	B	B	B	B	B	B
10	C	B	B	----	B	A	A	B	----
11	C	B	B	----	B	B	B	B	----
12	C	B	B	----	B	B	B	B	----
13	B	A	A	----	B	B	B	B	----
14	A	A	A	B	A	A	A	A	A
15	A	B	B	B	B	B	B	B	B
16	A	A	A	A	A	A	A	A	A
17	A	A	A	A	A	A	A	A	A
18	A	B	B	B	B	B	B	B	B
19	A	A	A	B	A	A	A	A	A
20	B	A	A	----	A	A	A	A	B
21	A	B	B	B	B	B	B	B	B
22	A	A	A	A	A	A	A	A	A
23	A	B	B	B	B	B	B	B	B
24	B	B	B	B	B	B	B	B	B
25	A	A	A	B	A	A	A	A	B
26	B	A	A	----	A	B	B	A	B
27	B	A	A	A	A	A	A	A	----
28	B	B	B	B	B	B	B	B	B
29	B	B	B	A	B	B	B	B	B

Tabla 6.6 Intercambio de créditos óptimo. Caso de Estudio 1.

Fuente Puntual	Modelo Base (Solución caso base)		Modelo para evitar puntos calientes, restricciones zonas geográficas (solución zonas, SF=1.05)	
	Créditos comprados (g/año)	Créditos vendidos (g/año)	Créditos comprados (g/año)	Créditos vendidos (g/año)
1	2.4520	----	----	4.1397
2	----	0.1243	----	0.1243
3	----	----	----	----
4	----	0.1865	0.2509	----
5	----	0.1160	----	0.1160
6	----	0.4951	----	0.1857
7	----	0.0663	----	0.0663
8	----	1.7532	2.1747	----
9	----	0.1865	----	0.1865
10	----	0.1658	0.1216	----
11	----	0.1713	0.1155	----
12	----	0.1492	0.1398	----
13	----	0.5498	0.3070	----
14	----	0.2601	----	0.2601
15	0.0821	----	0.0821	----
16	----	0.1989	----	0.1989
17	----	3.4812	----	3.4812
18	0.7690	----	0.7690	----
19	----	0.0398	----	0.0398
20	----	0.0580	----	0.0080
21	4.5955	----	4.5955	----
22	----	0.0647	----	0.0647
23	0.4696	----	0.4696	----
24	----	0.1062	----	0.1062
25	----	0.0601	0.0165	----
26	----	0.0932	----	0.0242
27	----	0.0007	0.0006	----
28	----	0.0344	----	0.0344
29	----	0.0067	----	0.0067

En las Tablas 6.3 y 6.5 se puede observar que la configuración óptima obtenida por la resolución del modelo base requiere la instalación de 29 unidades de tecnología de tratamiento de contaminantes; 12 de tipo A, 17 de tipo B y ninguna de tipo C. En las mismas

tablas se puede observar cómo se modifican las configuraciones óptimas para evitar puntos calientes cuando se añaden las restricciones ambientales de las diferentes zonas geográficas (solución zonas). Cuando SF es igual a 1.05 (valores de SF cercanos a 1 implican límites ambientales más estrictos) se requieren solamente 23 unidades de tecnologías de tratamiento (7 de tipo A y 16 de tipo B). Se debe notar que la tecnología de tratamiento de contaminante más efectiva, pero también la más costosa es la de adsorción por carbón activado (A). Por el contrario, la tecnología menos eficiente y más barata es la tecnología de intercambio de iones (C). Se pueden realizar algunas observaciones interesantes cuando se comparan los resultados de las dos configuraciones antes mencionadas:

- a) Los costos de implementación de tecnología para los resultados del modelo que considera zonas geográficas son mayores que los costos del modelo base. Esto tiene sentido debido a que la solución de zonas geográficas evita la creación de puntos calientes mediante la adición de restricciones ambientales, límites ambientales más estrictos implican costos más elevados.
- b) La observación anterior es cierta incluso cuando en la solución zonas con un valor de $SF = 1.05$ se requieren solamente 23 unidades de tratamiento (en vez de 29 unidades requeridas por la mayoría de las otras soluciones). Esto se puede explicar a partir de los datos mostrados en las Tablas 6.1 y 6.6. En la Tabla 6.1 los valores más altos de reducción de contaminante deseada corresponden a las fuentes puntuales 1, 17 y 21. La fuente puntual 17 requiere la implementación de la tecnología A (la más costosa) en todas las soluciones. De igual manera, los resultados óptimos sugieren que la fuente puntual 21 debe implementar la tecnología de tratamiento B en todos los casos y comprar créditos para satisfacer las restricciones ambientales, a excepción de la

solución de implementación de tecnología. Sin embargo, la fuente puntual 1 puede implementar la tecnología B y cumplir las regulaciones ambientales comprando créditos en todos los casos, excepto cuando $SF=1.05$ y en la solución de implementación de tecnología; en estos dos casos la solución óptima indica que la fuente puntual 1 debe implementar la tecnología A. Estos dos casos requieren la implementación de tecnologías de tratamiento más eficientes para satisfacer las restricciones ambientales. Este simple cambio en la configuración realmente afecta el valor de la función objetivo, debido a que la implementación de la tecnología A en la fuente puntual 1 incrementa de manera importante los costos de implementación de tecnología, se debe recordar que el costo de implementación de tecnología es una función lineal de la cantidad de volumen tratado en cada fuente puntual.

- c) La implementación de la tecnología A en la fuente puntual 1 también impacta las decisiones óptimas en el intercambio de créditos de contaminante (véase la Tabla 6.6). Cuando se instala la tecnología B en la fuente puntual 1 (solución caso base), esa fuente puntual requiere comprar créditos para así satisfacer las restricciones impuestas. Por otra parte, cuando se implementa la tecnología A (cuando SF es igual a 1.05), la fuente puntual 1 incluso tiene la capacidad de obtener beneficios económicos mediante la venta de créditos de contaminante.
- d) Cuando el valor de SF es igual a 1.05 se incluye una restricción que debe ser satisfecha por cada una de las zonas geográficas. Cuando se implementa la tecnología A en la fuente puntual 1 se evita la creación de un punto caliente, y las fuentes puntuales cercanas encuentran más conveniente (desde el punto de vista económico) comprar créditos que implementar tecnologías de tratamiento. Las Tablas 6.5 y 6.6 muestran que las fuentes puntuales 4, 10, 11, 12 y 13 compran créditos de

contaminante en lugar de implementar la tecnología B cuando la fuente puntual 1 instala la tecnología de tratamiento A.

También se pueden observar diferencias entre los resultados de las soluciones multas 1, multas 2 y la solución con zonas geográficas. Para algunas fuentes contaminantes es más conveniente (desde el punto de vista económico) pagar penalizaciones económicas que instalar tecnologías de tratamiento de efluentes. A través del análisis presentado, las autoridades, grupos ambientalistas, industriales y quienes toman decisiones pueden determinar qué fuentes puntuales requieren la instalación de tecnología, y cuáles pueden considerar otras alternativas (intercambiar créditos o pagar multas). Otras aplicaciones del modelo presentado incluyen la estimación del valor adecuado para las penalizaciones económicas impuestas a quienes no satisfagan los límites ambientales establecidos.

6.2 CASO DE ESTUDIO 2. MODELO QUE INCORPORA EL MFA.

Para evaluar el desempeño del modelo desarrollado en el Capítulo 5, se analiza un caso de estudio correspondiente al manejo y control de los niveles de fósforo presentes en el sistema de drenaje de Bahr El-Baqar en Egipto. Este caso de estudio fue reportado previamente por Lovelady y col. (2009). La Figura 6.8 muestra una representación esquemática del sistema de drenaje considerado. En este caso de estudio la relación de intercambio de créditos contaminantes r se considera igual a 1.1. Las Tablas 6.7, 6.8 y 6.9 muestran los diversos parámetros asociados con cada fuente puntual (descargas volumétricas y concentraciones) en los tributarios y tramos, respectivamente.

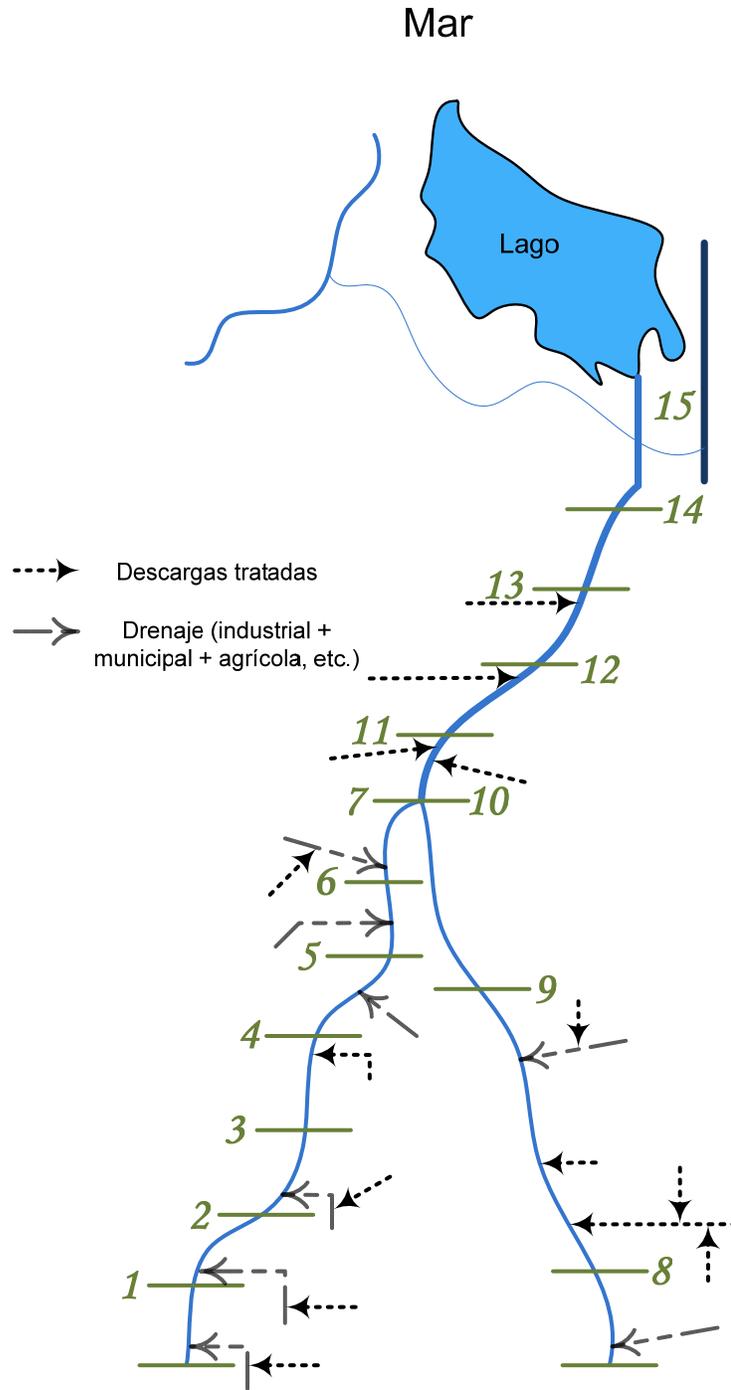


Figura 6.8 Representación esquemática del caso de estudio 2.

Tabla 6.7 Descarga volumétrica de las fuentes puntuales en los tributarios (m^3/s). Caso de Estudio 2.

Tramo	Tributario					
	1	2	3	4	5	6
1	0.2409	0.6732	0.1518	0.0627	0.5940	----
2	2.6400	0.1254	0.3762	----	----	----
3	0.0462	2.0460	0.1518	0.1782	----	----
4	0.0264	0.1716	1.1880	0.2310	0.0924	0.0330
5	0.5280	0.1584	0.1386	0.0495	0.0594	----
6	0.3267	0.1782	0.9042	4.0788	----	----
7	0.5742	0.0660	0.3498	----	----	----
8	----	----	----	----	----	----
9	0.4620	0.1254	----	----	----	----
10	0.6336	1.0560	----	----	----	----
11	0.0990	0.1980	2.0460	----	----	----
12	0.7590	0.1320	0.3960	----	----	----
13	1.1220	0.6666	----	----	----	----
14	1.1220	3.1020	----	----	----	----
15	3.1231	3.7950	----	----	----	----

Tabla 6.8 Concentración de las descargas de las Fuentes puntuales en los tributarios (ppm).
Caso de Estudio 2

Tramo	Tributario					
	1	2	3	4	5	6
1	8.0	3.0	5.0	10.0	15.0	----
2	8.0	4.0	9.0	----	----	----
3	15.0	14.0	12.0	5.0	----	----
4	21.0	17.0	12.0	8.0	3.0	2.0
5	16.0	13.0	10.0	8.0	5.0	----
6	9.0	14.0	15.0	20.0	----	----
7	8.0	9.0	11.0	----	----	----
8	----	----	----	----	----	----
9	5.0	13.0	----	----	----	----
10	11.0	15.0	----	----	----	----
11	18.0	13.0	12.0	----	----	----
12	5.0	8.0	7.5	----	----	----
13	4.0	6.0	----	----	----	----
14	12.0	7.0	----	----	----	----
15	8.0	6.0	----	----	----	----

Tabla 6.9 Datos para descarga volumétrica (m³/s) y concentración (ppm) de las
fuentes puntuales en los tramos. Caso de Estudio 2.

Tramo	Descarga volumétrica (m ³ /s)	Concentración de la descarga (ppm)
1	0.0133	12.0
2	0.0497	10.0
3	0.0133	15.0
4	0.0186	16.0
5	----	----
6	0.0700	9.0
7	----	----
8	----	----
9	----	----
10	----	----
11	0.3900	8.0
12	----	----
13	0.4650	9.0
14	----	----
15	----	----

Se consideran tres diferentes tecnologías para tratamiento de contaminantes. Todas las tecnologías se encuentran disponibles para cada fuente contaminante. El costo total de la planta de tratamiento incluye costos fijos y costos variables por unidad de volumen tratado. La Tabla 6.10 muestra los parámetros asociados con cada tecnología de tratamiento de contaminante, el cuarto renglón de esta tabla corresponde a los datos de la tecnología de tratamiento ficticia, utilizada para modelar el bypass de corrientes.

Tabla 6.10 Datos para las diferentes tecnologías de tratamiento. Caso de Estudio 2.

Tecnología de tratamiento	Factor de Eficiencia γ	Costo Fijo CF (\$)	Costo Variable CV (\$/m ³)
1	0.95	568,000	0.235
2	0.84	446,000	0.193
3	0.76	353,000	0.168
4	0	0	0

Se hizo un análisis variando el valor del límite de concentración de contaminante, LC , desde 0.53 hasta 21 ppm; estos son los límites en los cuales el sistema tiene solución. Con el valor más bajo de LC todas las fuentes puntuales consideradas deben instalar la mejor tecnología disponible. Por otra parte, el valor más alto de LC es igual al valor más alto de las concentraciones iniciales de las fuentes puntuales. La Figura 6.9 muestra la variación del valor de la función objetivo cuando se implementa el intercambio de créditos contaminantes contra la cantidad total de contaminante descargado por todas las fuentes puntuales después de que se han implementado las tecnologías de tratamiento para diferentes valores de LC , desde 0.53 ppm hasta 21 ppm.

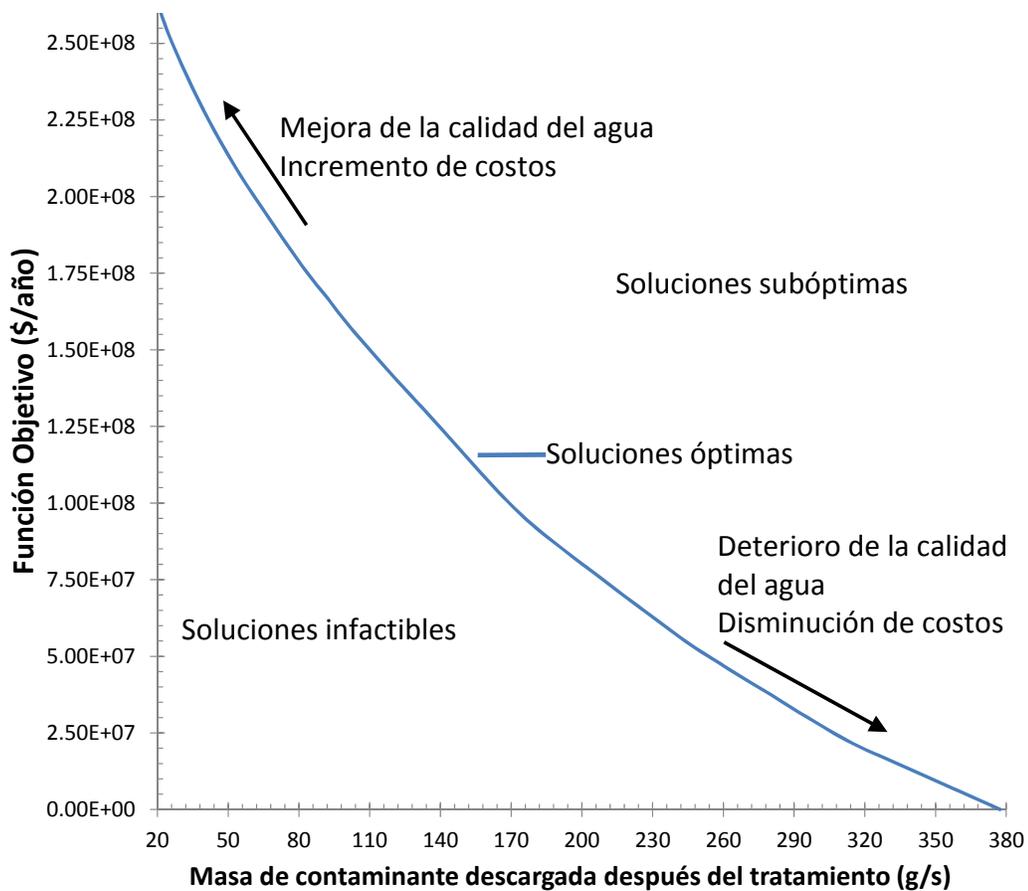


Figura 6.9 Función objetivo contra masa total de contaminante liberada por todas las fuentes puntuales después de la implementación de tecnología para diferentes valores de LC .

Para determinar el comportamiento del sistema cuando no existe control de la cantidad de contaminante liberado a la cuenca hidrológica, se simula el modelo utilizando un valor grande de LC . Con esto se puede establecer la máxima cantidad de contaminante descargada por todas las fuentes en la cuenca hidrológica, en cada tramo y en cada tributario. Esta solución se establece como el estado inicial del sistema.

Otro de los casos analizados es cuando todas las fuentes contaminantes instalan la mejor tecnología disponible y no existe compra o venta de créditos entre ningún par de fuentes contaminantes. Este caso se nombra como implementación de la mejor tecnología. Los resultados para la implementación de la mejor tecnología se obtienen añadiendo una restricción que evita la compra o venta de créditos de contaminante entre cualquier par de fuentes puntuales. La solución de este caso provee un límite inferior para las concentraciones de contaminante en tramos y tributarios, y la cantidad de contaminante descargado por todas las fuentes puntuales, además provee un límite superior para el valor de la función objetivo (el máximo costo posible para controlar la contaminación).

Para comparar los resultados cuando la estrategia de intercambio de créditos de contaminante se implementa, se presentan los resultados para cuando LC es igual a 2.5. A estos resultados se les denomina solución intercambio de créditos y solución sin intercambio de créditos.

Los resultados incluyen una comparación entre las diferentes soluciones: (a) Estado inicial, (b) Implementación mejor tecnología, (c) solución intercambio de créditos y (d) solución sin intercambio de créditos. La Tabla 6.11 resume los resultados para todos los casos descritos con anterioridad. Se debe notar que cuando se permite el intercambio de créditos de contaminante el valor de la función objetivo es 5.6% menor que el valor obtenido cuando la

contaminación se controla únicamente mediante la implementación de tecnología. Además, la cantidad de contaminante descargada por las fuentes puntuales cuando se implementa la estrategia de intercambio de créditos es menor que la cantidad descargada cuando la contaminación se controla sólo a través de la implementación de tecnología.

Tabla 6.11 Resultados para el Caso de Estudio 2

	Función objetivo x10 ⁶ (\$)	Masa total de contaminante descargada por todas las fuentes puntuales (g/s)	Unidades implementadas de cada tecnología			
			Tipo1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Estado inicial	0.000	377.40	0	0	0	53
Implementación de la mejor tecnología	267.102	18.87	53	0	0	0
Solución intercambio de créditos	170.250	88.53	10	11	21	15
Solución sin intercambio de créditos	180.407	90.71	7	20	35	40

Es importante analizar el estado inicial del sistema para establecer límites de las concentraciones y cantidades de contaminante descargadas en los diferentes tramos y tributarios. La Tabla 6.12 muestra la concentración de contaminante en los tramos para las diferentes soluciones. Una de las ventajas del modelo propuesto es que permite la adición de restricciones usadas para limitar la concentración de contaminante en un tramo o tributario en particular. Esto es útil para prevenir y evitar la creación de puntos calientes a lo largo de la cuenca hidrológica, para designar tramos o tributarios para usos específicos, o para establecer restricciones ambientales más estrictas en una zona específica de la cuenca.

Tabla 6.12 Concentración de contaminante en los tramos (ppm). Caso de Estudio 2.

Tramo	Estado Inicial	Implementación mejor tecnología	Solución Intercambio de créditos	Solución sin intercambio de créditos
1	5.656	3.896	4.349	4.373
2	4.729	3.128	3.498	3.570
3	13.014	7.012	7.876	8.303
4	12.009	4.974	5.913	6.372
5	7.311	2.836	3.332	3.624
6	7.283	0.659	0.781	1.331
7	9.165	3.734	3.960	4.403
8	1.200	1.200	1.200	1.200
9	6.324	6.291	6.295	6.296
10	14.687	14.262	14.311	14.339
11	5.471	2.252	2.548	2.758
12	1.508	0.686	0.928	0.884
13	0.724	0.190	0.408	0.335
14	0.200	0.166	0.180	0.175
15	0.473	0.470	0.471	0.471

Las Tablas 6.13 y 6.14 muestran las decisiones óptimas del intercambio de créditos para las fuentes puntuales $I_{r,t}$ y H_r respectivamente. Si el valor es positivo la fuente puntual compró créditos de contaminante; si el valor es negativo, la fuente puntual vendió créditos. Para este caso de estudio el mercado de créditos de contaminante cuando $LC = 2.5$ ppm es de 23.85 g/s, esta es la cantidad total de créditos intercambiados entre todas las fuentes puntuales. Cuando la estrategia de intercambio de créditos contaminantes no está implementada, el valor más bajo de LC que se puede satisfacer es igual a la concentración más alta de todas las fuentes puntuales después de implementar la mejor tecnología de tratamiento; esto es $LC = 1.05$ ppm (para $I_{4,1}$). Cuando se implementa la estrategia de intercambio de créditos de contaminante, LC puede tomar valores más bajos, siendo el más bajo para este caso de estudio 0.529572 ppm.

Tabla 6.13 Intercambio de créditos óptimo para las fuentes puntuales $I_{r,t}$. Créditos comprados (+), créditos vendidos (-). Caso de Estudio 2.

Tramo	Tributario					
	1	2	3	4	5	6
1	-0.140	0.370	0.417	-0.006	-1.040	
2	-1.531	0.207	-0.128			
3	-0.005	-3.683	-0.088	0.490		
4	-0.038	-0.283	-0.689	-0.134	0.051	
5	-0.898	-0.067	-0.014		0.163	
6	-0.111	-0.321	-1.582	-6.118		
7	-0.333	-0.022	-0.258			
8						
9	1.271	-0.053				
10	-0.469	-1.848				
11	-0.158	-0.083	-1.187			
12	2.087	-0.077				
13	1.851	2.566				
14	-0.651	0.130				
15	-1.811	14.611				

Finalmente, un sistema de implementación como el descrito en este trabajo puede ser usado para realizar diferentes acciones, como por ejemplo estimar los valores apropiados para el *TMDL*, *LC* y otros límites ambientales para tramos y tributarios a lo largo de la cuenca hidrológica. A través de este análisis es posible determinar qué fuentes puntuales requieren de la implementación de tecnología, y cuáles pueden considerar otras alternativas para controlar sus efluentes contaminados. Además, mediante la incorporación del análisis de flujo de masa se puede determinar el comportamiento antes y después de la implementación de tecnología y de la estrategia de intercambio de créditos de contaminante. Con esto es posible determinar los límites de descargas máximas y mínimas y el costo máximo asociado a la implementación de tecnología.

Tabla 6.14 Intercambio de créditos óptimo para las fuentes puntuales H_r . Créditos comprados (+), créditos vendidos (-). Caso de Estudio 2.

Tramo	Créditos
1	0.006
2	-0.005
3	0.016
4	0.001
5	
6	-0.024
7	
8	
9	
10	
11	-0.226
12	
13	-0.158
14	
15	

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS

FUTUROS

En este último capítulo se exponen las conclusiones más importantes generadas a partir del análisis de los resultados de los casos de estudio y modelos desarrollados en este trabajo. De igual manera, se presentan algunas sugerencias para estudios posteriores en el intercambio de créditos contaminantes.

7.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan varios modelos de programación matemática para representar la implementación de la estrategia de intercambio de créditos de contaminante. Dado el desarrollo del modelo base, la adición de nuevas restricciones para evitar puntos calientes previene la existencia de zonas con altas concentraciones de contaminante que pudieran poner en riesgo las condiciones ambientales de la cuenca hidrológica. El sistema de penalizaciones económicas incorporado a la formulación proporciona una relajación a las restricciones ambientales del problema. Sin embargo, siempre es deseable que los límites ambientales se cumplan para prevenir efectos dañinos en el ambiente.

El modelo que incorpora el análisis de flujo de materia (MFA) presenta una nueva metodología para la implementación de la estrategia de intercambio de créditos contaminantes, considerando la sostenibilidad de los alrededores de la cuenca hidrológica. En este caso, el intercambio de créditos se lleva a cabo entre fuentes puntuales localizadas en diferentes lugares de una cuenca hidrológica, en la cual se deben establecer diversas restricciones ambientales. Las fuentes puntuales pueden i) comprar créditos cuando sus descargas exceden los límites de concentración o ii) instalar tecnologías de tratamiento para controlar sus efluentes contaminados y satisfacer las concentraciones permitidas en sus descargas. En el segundo caso, las fuentes también tienen la oportunidad de vender créditos de contaminante. El modelo se formuló para predecir el comportamiento de la cuenca hidrológica siendo afectada por diversas fuentes de contaminación (descargas industriales, descargas residenciales, descargas agrícolas, etc.). El análisis de flujo de materia se utiliza en el modelo para considerar la degradación natural de contaminantes a lo largo de la cuenca hidrológica. Este modelo además permite el establecimiento de restricciones ambientales en

zonas específicas de la cuenca hidrológica. Por ejemplo, cuando se requiere que el uso del agua en alguna zona satisfaga algún límite de calidad, el análisis también puede ser utilizado para prevenir y evitar la creación de puntos calientes o puntos con alta concentración de contaminante que pudieran poner en riesgo las condiciones ambientales de la cuenca.

Ambos modelos determinan la configuración óptima de las unidades de tratamiento, y sus funciones objetivo consisten en la minimización de los costos asociados a la instalación de las tecnologías requeridas para tratamiento de efluentes. El mercado de créditos de contaminante ayuda a los participantes a satisfacer los estándares de calidad ambiental al menor costo posible, y proporciona flexibilidad para cumplir las reducciones de contaminante deseadas.

Estos modelos proporcionan una metodología novedosa que puede ser útil para autoridades, industriales, grupos ambientalistas y quienes toman decisiones durante la implementación de los programas de intercambio de créditos contaminantes, para la determinación de:

- a) Los límites ambientales adecuados para la implementación del intercambio de créditos contaminantes.
- b) El efecto de la implementación de multas a quienes no cumplan las restricciones ambientales.
- c) El valor adecuado para las multas.
- d) Las fuentes puntuales que presentan mayor impacto ambiental en las cuencas hidrológicas.
- e) El comportamiento del sistema antes y después de la implementación de la estrategia de intercambio de créditos.

- f) Los límites máximos y mínimos de concentraciones en diferentes partes de la cuenca.
- g) El intercambio óptimo de créditos y el tamaño del mercado de créditos contaminantes.
- h) La factibilidad de la implementación de la estrategia de intercambio de créditos en una cuenca hidrológica.

El intercambio de créditos contaminantes no sustituye las regulaciones ambientales, pero provee un mecanismo para que las fuentes reguladas cumplan los estándares de calidad ambiental establecidos a un costo menor que aquél relacionado con políticas de comando y control.

7.1.1 Conclusiones Particulares del Caso de Estudio 1 (Modelo Base).

En el desarrollo del Caso de Estudio 1 se considera un sistema de penalizaciones económicas el cual ayuda a relajar el problema de optimización, y provee una alternativa a las fuentes contaminantes que no pueden reducir sus emisiones a través de la implementación de tecnología o el intercambio de créditos. Los valores de las penalizaciones económicas se eligieron de acuerdo al costo total de implementación de tecnología por kilogramo de contaminante reducido. Si los valores de las penalizaciones económicas se incrementan, se obliga a los participantes a cumplir las regulaciones ambientales. Por otra parte, si el valor de las penalizaciones económicas es muy bajo esto podría producir consecuencias ambientales contrarias a las deseadas, debido a que las fuentes contaminantes preferirían pagar una multa a implementar tecnología o intercambiar créditos. Aunque las penalizaciones cobradas por las autoridades ambientales podrían ser usadas para recompensar a las fuentes puntuales que reducen sus emisiones por debajo de los límites establecidos, o para instalar

plantas de tratamiento de contaminantes en lugares estratégicos para satisfacer las regulaciones ambientales en los ríos, no sustituyen por completo las regulaciones ambientales.

Algunas de las desventajas del modelo son: 1) No se considera la dinámica del contaminante descargado con el sistema, es decir no se consideran dispersiones, interacciones con otros contaminantes o reacciones químicas. 2) Tampoco se consideran afluentes y efluentes en el caso de estudio desarrollado, se considera que todas las descargas ocurren en el afluente principal del cuerpo hidráulico.

7.1.2 Conclusiones particulares del Caso de Estudio 2 (Modelo que incorpora el MFA).

En el caso de estudio mostrado primero se determina el estado inicial del sistema; es decir, se determina la cantidad de contaminante presente en el cuerpo hidráulico cuando no se implementa ninguna tecnología de tratamiento, de este modo se puede determinar la descarga máxima debida a las fuentes puntuales. Además, se analizó el caso en el cual las fuentes puntuales implementan la mejor tecnología disponible, para así obtener: la cantidad de descarga mínima de contaminante que se puede lograr y un límite superior para la función objetivo.

Una de las ventajas del modelo propuesto es que permite la adición de restricciones usadas para limitar la concentración de contaminante en un tramo o tributario en particular. Esto es útil para prevenir y evitar la creación de puntos calientes a lo largo de la cuenca hidrológica, para designar tramos o tributarios para usos específicos, o para establecer restricciones ambientales más estrictas en una zona específica de la cuenca. El modelo mostrado en el caso

de estudio y su implementación, puede ser usado para: estimar los valores apropiados para el *TMDL*, *LC* y otros límites ambientales para los distintos tramos y tributarios presentes a lo largo de la cuenca hidrológica. A través de este análisis es posible determinar qué fuentes puntuales requieren de la implementación de tecnología, y cuáles pueden considerar otras alternativas para controlar sus efluentes contaminados. Además, mediante la incorporación del análisis de flujo de masa se puede determinar el comportamiento antes y después de la implementación de tecnología y de la estrategia de intercambio de créditos de contaminante. Con esto es posible determinar los límites de descargas máximas y mínimas y el costo máximo asociado a la implementación de tecnología.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

Existen diversas mejoras potenciales a los modelos presentados en este trabajo. Primero, se podría incorporar la aplicación de penalizaciones económicas en el modelo que incorpora el análisis de flujo de materia, y así obtener un modelo más completo. Además, se puede desarrollar un modelo multiperiódico; este modelo permitiría la incorporación de los conceptos de banco de créditos e intercambio intertemporal de créditos de contaminante. El modelo multiperiódico podría ser útil en la elaboración de programas de remediación ambiental incorporando la estrategia de intercambio de créditos contaminantes. Este sería un paso más para considerar la sostenibilidad de sistemas hidrológicos.

Los modelos desarrollados en este trabajo consideran sólo un contaminante, una mejora a estos modelos podría lograrse a través de la incorporación del concepto de “cross trading” en los modelos desarrollados. Este término se refiere al intercambio de créditos de diversos contaminantes. Por otra parte, los modelos presentados en este trabajo son deterministas, una

mejora importante en los modelos consiste en considerar las incertidumbres relacionadas con el sistema (como por ejemplo variaciones estacionales de temperatura y precipitación) e incertidumbres relacionadas con las fuentes puntuales (variaciones en descargas volumétricas y concentraciones).

Como una extensión a este trabajo se propone utilizar los conceptos desarrollados para cuerpos hidráulicos en la elaboración de nuevos modelos de programación matemática que incorporen el intercambio de créditos contaminantes y el análisis de flujo de materia al control y manejo de emisiones atmosféricas.

REFERENCIAS

- Baccini P., Brunner P., 1991. *Metabolism of the anthroposphere*, Berlin: Springer Verlag.
- Bosetti V., Carraro C., Massetti E., 2009. Banking permits: economic efficiency and distributional effects, *Journal of Policy Modeling*, 31, 382–403.
- Burtraw D., 1996. The SO₂ emissions trading program: cost savings without allowance trades. *Contemporary Economic Policy*, 14, 79-94.
- Burtraw D., Krupnick A. J., Mansur E., Austin D, Farrel D., 1998. The costs and benefits of reducing air pollution related to acid rain, *Contemporary Economic Policy*, 16, 379-400.
- Burtraw D., Mansur E., 1999. The environmental effects of SO₂ trading and banking, *Environmental Science and Technology*, 33(20), 3489-3494.
- Burtraw D., Evans D., Krupnick A., Palmer K., Toth R., 2005. Economics of pollution trading for SO_x and NO_x, *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 253-289.
- Crocker T., 1966. *The economics of air pollution, structuring of air pollution control systems*, New York: W. W. Norton.

- Dales J., 1968. Pollution, property and prices, Toronto: University of Toronto Press.
- El-Baz A. A., Ewida, K. T., Shouman, M. A., El-Halwagi M. M., 2005. Material flow analysis and integration of watersheds and drainage systems. I: Simulation and application to ammonium management in Bahr El-Baqar drainage system, *Clean Technology and Environmental Policy*, 7(1), 51–61.
- El-Baz A. A., Ewida K. T., Shouman M. A., El-Halwagi M. M., 2005. Material flow analysis and integration of watersheds and drain systems. II: Integration and solution strategies with application to ammonium management in Bahr El-Baqar drain system, *Clean Technology and Environmental Policy*, 7(1), 51–61.
- Ferral B. L., 1991. The clean air act amendments and the use of market forces to control sulfur dioxide emissions, *Harvard Journal on Legislation*, 28, 235-252.
- Ghosh G., Ribaud M., Shortle J., 2011. Baseline requirements can hinder trades in water quality programs: Evidence from the Conestoga watershed, *Journal of Environmental Management*, 92, 2076-2084.
- Gray W. B., Shadbegian R. J., 2004. Optimal pollution abatement—whose benefits matter, and how much? *Journal of Environmental Economics and Management*, 47, 510-534.
- Hung M. F., Shaw D., 2005. A trading-ratio system for trading water pollution discharge permits, *Journal of Environmental Economics and Management*, 49, 83-102.
- Idaho department of environmental quality: Boise, ID, 2010. Water quality pollutant trading guidance.

- Innes R., 2002. Stochastic pollution, costly sanctions, and optimality of emission permit banking, *Journal of Environmental Economics and Management*, 45, 546–568.
- Jarvie M., Solomon B., 1998. Point-non point effluent trading in watershed: A review and critique, *Environmental Impact Assessment Review*, 18, 135-157.
- Kling K., Rubin J. D., 1997. Bankable permits for the control of environmental pollution, *Journal of Public Economics*, 64, 101–115.
- Lal H., Delgado J. A., Gross C. M., Hesketh E., McKinney S. P., Cover H., Shaffer M., 2009. Market-based approaches and tools for improving water and air quality, *Environmental Science and Policy*, 12, 1028–1039.
- Lampert C., Brunner P. H., 1999. Material accounting as a policy tool for nutrient management in the Danube Basin, *Water Science and Technology*, 40(10), 43-49.
- Lankoski J., Lichtenberg E., Olikainen M., 2008. Point/nonpoint effluent trading with spatial heterogeneity, *American Journal of Agricultural Economics*, 90, 1044-1058.
- Lira-Barragán L. F., Ponce-Ortega J. M., Serna-González M., El-Halwagi M. M., 2011. An MINLP model for the optimal location of a new industrial plant with simultaneous consideration of economic and environmental criteria, *Industrial Engineering and Chemistry Research*, 50 (2), 953–964.
- Lira-Barragán L. F., Ponce-Ortega J. M., Serna-González M., El-Halwagi M. M., 2011. Synthesis of water networks considering the sustainability of the surrounding watershed, *Computers and Chemical Engineering*, 35 (12), 2837–2852.

- Lira-Barragán L. F., Ponce-Ortega J.M., Nápoles-Rivera F., Serna-González M., El-Halwagi M.M., 2013. Incorporating the property-based water networks and surrounding watersheds in site selection of industrial facilities. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52 (1), 91–107.
- Lovelady E. M., El-Baz A. A., El-Monayeri D., El-Halwagi M. M., 2009. Reverse problem formulation for integrated process discharges with wastewater and drainage systems: Managing phosphorus in Lake Manzala, *Journal of Industrial Ecology*, 13, 914-927.
- Luo B., Maqsood I., Huang G. H., Yin Y. Y., Han D. J., 2005. An inexact fuzzy two stage stochastic model for quantifying the efficiency of nonpoint source effluent trading under uncertainty, *Science of the Total Environment*, 347, 21-34.
- Montgomery D., 1972. Markets in licenses and efficient pollution control programs, *Journal of Economic Theory*, 395-418.
- Roberts D. C., Clark C. D., Park W. M., English, B. C., 2008. A spatial assessment of possible water quality trading markets in Tennessee, *Review of Agricultural Economics*, 30, 711–728.
- Rousseau S., 2001. Effluent trading to improve water quality: what do we know today?, Working Paper No. 2001-26, Center for Economic Studies in Energy, Transport and Environment, Faculty of Economics and Applied Economic Sciences, Katholieke Universiteit Leuven.
- Rubin J. D., 1996. A model of intertemporal emission trading, banking and borrowing, *Journal of Environmental Economics Management*, 31, 269–286.

- Sarang A., Lence B. J., Shamsai A., 2008. Multiple interactive pollutants in water quality trading, *Environmental Management*, 42, 620-646.
- Selman M., Greenhalgh S., Branosky E., Jones C., Guiling J., 2009. Water quality trading programs: An international overview. Washington D.C.: World Resources Institute (WRI).
- Shastri Y., Diwekar U., Mehrotra S., 2005. An innovative trading approach for mercury waste management, *International Journal of Innovation Science*, 3, 9-22.
- Smajgl A., Heckbert S., Ward J., Stratron A., 2009. Simulating impacts of water trading in an institutional perspective, *Environmental Model Software*, 24, 191–201.
- USEPA Report 841-D-99-001; USEPA: Washington, DC. 1999. Draft guidance for water quality-based decisions: The TMDL Process, 2nd edition.
- USEPA 2004. Water quality trading assessment handbook.
- USEPA 2008. Water quality trading evaluation, final report.
- Wang X., Zhang W., Huang Y., Li S., 2004. Modeling and simulation of point-non-point source effluent trading in Taihu Lake area: perspective of non-point sources control in China, *Science of the Total Environment*. 325, 39-50.
- Woodward R. T., 2003. Lessons about effluent trading from a single trade, department of agricultural economics: Washington, DC.

Zhang W., Wang X. J., 2002. Modeling for point-non-point source effluent trading: perspective of non-point sources regulation in China. *The Science of the Total Environment*. 292, 167-176.

Zhang H. X., 2008. Linking trading ratio with TMDL (total maximum daily load) allocation matrix and uncertainty analysis, *Water Science and Technology*, 58, 103–108.

Apéndice A

NOMENCLATURA

En este apéndice se muestra la nomenclatura usada en la formulación de los modelos desarrollados en el Capítulo 4 y Capítulo 5.

A.1 NOMENCLATURA CAPÍTULO 4.

Índices

- i fuente puntual.
 j tecnología de tratamiento.
 l zona geográfica.

Conjuntos

- I conjunto para las fuentes puntuales, $\{i | i = 1, \dots, N\}$.
 J conjunto las tecnologías de tratamiento, $\{j | j = 1, \dots, M\}$.
 G conjunto para las zonas geográficas, $\{l | l = 1, \dots, L\}$.

Parámetros

- C_i^0 concentración de contaminante en la descarga de PS_i (masa/volumen).
 F_{i2} valor de la penalización económica.
 LC límite de concentración de contaminante para todas las fuentes puntuales (masa/volumen).
 MC límite superior del número de créditos de contaminante que una fuente puntual PS_i tiene permitido vender o comprar (masa/año).
 MU límite superior que establece el valor a partir del cual se deben aplicar las penalizaciones económicas.
 PC costo de un crédito de contaminante que debe ser pagado por una fuente puntual a otra por controlar sus efluentes contaminados.
 prc_j reducción potencial de contaminante por parte de la tecnología j (masa/volumen tratado).

PS_i	fuelle puntual i .
r	relación de intercambio, unidades que debe comprar una fuente puntual para disminuir sus emisiones contaminantes en una unidad.
SF	factor ambiental límite.
TAC_j	costo total anualizado de la tecnología de tratamiento j (\$/volumen tratado).
$TMDL$	descarga máxima total diaria (masa)
VD_i	volumen de descarga de agua contaminada por parte de la fuente PS_i (volumen/año).
ϕ	factor por el que se ha de multiplicar CPG para calcular las multas.

Variables

b_{ij}	variable binaria que representa la relación fuente puntual-tecnología instalada, igual a 1 cuando la fuente PS_i instala la tecnología j y 0 en caso contrario.
CC_{ik}	créditos de contaminante comprados por la fuente PS_i a la fuente PS_k .
CPG	costo por gramo de contaminante reducido cuando la reducción total deseada se lleva a cabo únicamente a través de la implementación de tecnología.
CPT_i	costo total del intercambio de créditos contaminantes (compra o venta) para una PS_i (\$/año).
$Cpurch_i$	cantidad total de créditos comprados por una PS_i (masa/año).
$Csold_i$	cantidad total de créditos vendidos por una PS_i (masa/año).
CTI_{ij}	costo de implementación de la tecnología j en la fuente PS_i (volumen/año).
dif_i	diferencia entre el nivel deseado de reducción y la reducción lograda después de que se ha implementado el intercambio de créditos contaminantes y se ha instalado tecnología de tratamiento de contaminante.
F_i	valor de la penalización impuesta a una fuente puntual por emitir más contaminante del permitido y violar las regulaciones ambientales (\$/masa).

LM_i	descarga másica máxima permisible para una PS_i con base en el <i>TMDL</i> (masa/año).
MD_i^0	descarga inicial de contaminante (descarga cuando no hay implementación de tecnología ni intercambio de créditos) por parte de PS_i (masa/año).
MPD_i	masa de contaminante descargado por la fuente PS_i a través de la implementación de la tecnología j (masa/volumen tratado).
P_i	costo para controlar emisiones que enfrenta PS_i cuando el intercambio de créditos de contaminante no es posible.
$PRTC_i$	reducción de contaminantes lograda por la fuente PS_i únicamente a través del intercambio de créditos contaminantes (masa/año).
red_i	reducción de contaminante deseada para la fuente PS_i .
rp_{ij}	contaminante removido en las descargas de la fuente PS_i a través de la implementación de la tecnología j (masa/volumen tratado).
TDR	reducción total de contaminante deseada dado el valor de <i>TMDL</i> (masa/año)
TP	costo total para controlar la contaminación cuando el intercambio de créditos no está implementado y las regulaciones ambientales se satisfacen únicamente a través de la implementación de las diversas tecnologías de tratamiento.
w_i	variable binaria asociada a la violación de las restricciones ambientales por parte de una PS_i .
yp_i	variable binaria asociada con los créditos comprados por una PS_i .
ys_i	variable binaria asociada con los créditos vendidos por una PS_i .

A.2 NOMENCLATURA CAPÍTULO 5.

Índices

j interceptor, tecnología de tratamiento.

r tramo.

r^* tramo.

t tributario.

t^* tributario.

Conjuntos

J conjunto para los interceptores, tecnologías de tratamiento, $\{j | j = 1, \dots, N_j\}$.

R conjunto para los tramos, $\{r | r = 1, \dots, N_r\}$.

T conjunto para los tributarios, $\{t | t = 1, \dots, N_t\}$.

Parámetros

AF factor para anualizar los costos fijos.

$A_{r,t}$ área cubierta por el afluente t en el tramo r , acres o hectáreas.

CD_r concentración de contaminante en las descargas directas en el r -ésimo tramo
ppm.

$CD_{r,t}$ concentración de los drenajes agrícolas descargados al t -ésimo tributario, *ppm*.

CF_j costos fijos de implementación de la tecnología j .

CH_r^0	concentración inicial de contaminante (sin implementación de tecnologías de tratamiento para remoción de contaminante) asociada a H_r .
$CH_{r,j}^{out}$	concentración de contaminante en la corriente de salida de H_r después de la implementación del tratamiento j .
$CI_{r,t}^0$	concentración inicial de contaminante (sin implementación de tecnologías de tratamiento para remoción de contaminante) asociada a $I_{r,t}$.
$CI_{r,t,j}^{out}$	concentración de contaminante en la corriente de salida $I_{r,t}$ después de la implementación del tratamiento j .
CL_r	concentración de contaminante en las pérdidas netas (evaporación, filtrado, etc.) del r-ésimo tramo, ppm .
$CL_{r,t}$	concentración de contaminante en las pérdidas del t-ésimo tributario, ppm .
CP_r	concentración de contaminante en las descargas pluviales en el r-ésimo tramo, ppm .
$CP_{r,t}$	concentración de contaminante en las descargas pluviales en el t-ésimo tributario, ppm .
$CST_{r,t}$	concentración del drenaje tratado descargado al t-ésimo tributario, ppm .
$CSU_{r,t}$	concentración del drenaje no tratado descargado al t-ésimo tributario, ppm .
CV_j	costos variables asociados a la implementación de la tecnología j , $\$/m_{treated}^3$.

D_r	descargas directas al r-ésimo tramo, m^3/s .
$D_{r,t}$	drenaje agrícola descargado al t-ésimo tributario, m^3/s .
$FT_{r,t}$	descarga de efluentes del t-ésimo tributario al r-ésimo tramo, m^3/s .
H_r	descarga total (descargas industriales + descargas sanitarias, etc.) al tramo r, m^3/s .
HY	horas de operación anual de la planta de tratamiento, h/año.
$I_{r,t}$	flujo de descargas industriales al t-ésimo tributario, m^3/s .
k_r	constante de velocidad de Arrhenius para las reacciones llevadas a cabo en el r-ésimo tramo.
$k_{r,t}$	constante de velocidad de Arrhenius para las reacciones llevadas a cabo en el t-ésimo tributario.
LC	límite de concentración de contaminante para todas las fuentes puntuales, con base en el TMDL.
L_r	pérdidas netas del r-ésimo tramo (debidas a filtración, evaporación, usos, etc.), m^3/s .
$L_{r,t}$	pérdidas netas del t-ésimo tributario (debidas a filtración, evaporación, usos, etc.), m^3/s .

M	cantidad máxima de créditos de contaminante que una fuente puede comprar o vender, g .
N_j	número total de tecnologías de tratamiento.
N_r	número total de tramos de río.
N_t	número total de tributarios.
$N_{t(r)}$	número total de tributarios descargando al tramo r .
P_r	descarga pluvial en el r -ésimo tramo, m^3/s .
$P_{r,t}$	descarga pluvial en el t -ésimo tributario, m^3/s .
Q_0	flujo inicial que entra al primer tramo, m^3/s .
Q_r	flujo que abandona el r -ésimo tramo, m^3/s .
Q_{r-1}	flujo que entra al r -ésimo tramo, m^3/s .
$ST_{r,t}$	drenaje tratado descargado al t -ésimo tributario, m^3/s .
$SU_{r,t}$	drenaje no tratado descargado al t -ésimo tributario, m^3/s .
$TMDL$	descarga máxima total diaria, g .
TR	relación de intercambio, unidades que debe comprar una fuente puntual para disminuir sus emisiones contaminantes en una unidad.
TVD	volumen total de efluentes descargados al río por todas las fuentes contaminantes, m^3/s .

U_r	usos del r-ésimo tramo, m^3/s .
$U_{r,t}$	usos del t-ésimo tributario, m^3/s .
V_r	volumen del tramo r, m^3 .
$V_{r,t}$	volumen del tributario t que descarga al tramo r, m^3 .
$\alpha_{r,t}$	flujo de agua por actividades agrícolas por unidad de área, $m^3/ha s$.
$\beta_{r,t}$	flujo de agua para usos agrícolas por unidad de área, $m^3/ha s$.
δ	parámetro con valor pequeño usado con propósitos de modelado
γ_j	factor de eficiencia relacionado a la remoción de contaminante de la tecnología j .

Variables

$CCHI_{r,r^*,t^*}$	créditos comprados por H_r a I_{r^*,t^*} .
CCH_{r,r^*}	créditos comprados por H_r a H_{r^*} .
$CCIH_{r,t,r^*}$	créditos comprados por $I_{r,t}$ a H_{r^*} .
CCI_{r,t,r^*,t^*}	créditos comprados por $I_{r,t}$ a I_{r^*,t^*} .
CH_r	concentración de contaminante de la descarga total al tramo r, ppm .
$CI_{r,t}$	concentración de los efluentes industriales descargados al t-ésimo tributario, ppm .

- $C_{purch}H_r$ total de créditos comprados por la fuente puntual H_r .
- $C_{purch}I_{r,t}$ total de créditos comprados por la fuente puntual $I_{r,t}$.
- CQ_r concentración de contaminante en la corriente que abandona el r-ésimo tramo, ppm .
- CQ_{r-1} concentración de contaminante en la corriente que abandona el tramo r-1, ppm .
- $C_{sold}H_r$ total de créditos vendidos por la fuente puntual H_r .
- $C_{sold}I_{r,t}$ total de créditos vendidos por la fuente puntual $I_{r,t}$.
- $CT_{r,t}$ concentración de las descargas del t-ésimo tributario al r-ésimo tramo, ppm .
- CU_r concentración de las corrientes usadas del r-ésimo tramo, ppm .
- $CU_{r,t}$ concentración de las corrientes usadas del t-ésimo tributario, ppm .
- $fH_{r,j}$ flujo de agua de H_r segregado al j-ésimo interceptor.
- $fI_{r,t,j}$ flujo de agua de $I_{r,t}$ segregado al j-ésimo interceptor.
- r_r velocidad de descomposición de contaminante en el r-ésimo tramo.
- $r_{r,t}$ velocidad de descomposición de contaminante en el t-ésimo tributario que descarga en el r-ésimo tramo.
- ypH_r variable binaria asociada con los créditos comprados por la fuente puntual H_r .
- $ypI_{r,t}$ variable binaria asociada con los créditos comprados por la fuente puntual $I_{r,t}$.

- ysH_r variable binaria asociada con los créditos vendidos por la fuente puntual H_r .
- $ysI_{r,t}$ variable binaria asociada con los créditos vendidos por la fuente puntual $I_{r,t}$.
- $zH_{r,j}$ variable binaria asociada con la existencia de la tecnología de tratamiento j en la fuente puntual H_r .
- $zI_{r,t,j}$ variable binaria asociada con la existencia de la tecnología de tratamiento j en la fuente puntual $I_{r,t}$.