

**SELECCIÓN DE LOS AGENTES REDUCTORES MAS EFICIENTES PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EN UNA PTAR
DE CROMADO UTILIZANDO LA METODOLOGIA ANP Y AHP**

ÁLVARO AUGUSTO ARANGO GARCÉS

Maestría en Diseño y Gestión de Procesos

Asesor

PhD. Luis Fernando Gutiérrez

Grupo Biosistemas

Facultad de Ingeniería

Universidad de La Sabana

BOGOTÁ, ENERO DE 2012

TABLA DE CONTENIDO

<u>RESUMEN</u>	<u>8</u>
<u>INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>11</u>
<u>CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO.....</u>	<u>21</u>
<u>1.1 LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y DECISIÓN MULTICRITERIO</u>	<u>22</u>
1.1.1 EL PROCESO DE TOMA DE DECISIÓN	22
<u>1.2 ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP- THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS-PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO).....</u>	<u>24</u>
1.2.1 BASE MATEMÁTICA DEL AHP	26
<u>1.3 ANÁLISIS EN RED (ANP- THE ANALYTIC NETWORK PROCESS)</u>	<u>31</u>
1.3.1 ESTRUCTURA DEL MODELO	34
1.3.2 ESTRUCTURA DE UNA DECISIÓN COMPLEJA	35
1.3.3 TIPOS DE COMPARACIÓN	36
1.3.4 METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN DEL ANP	37
<u>1.4 EL USO DE METODOS DE EVALUACION MULTICRITERIO EN PROBLEMAS AMBIENTALES.....</u>	<u>39</u>
<u>1.5 EL AGUA COMO BIOSISTEMA.....</u>	<u>41</u>
<u>1.6 TRATAMIENTO QUIMICO DE LOS DESECHOS DE CROMO HEXAVALENTE.....</u>	<u>42</u>
<u>CAPITULO 2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....</u>	<u>49</u>

<u>2.1 OBJETIVOS</u>	<u>51</u>
2.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	51
2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	51
<u>2.2 HIPÓTESIS</u>	<u>51</u>
<u>2.3 METODOLOGIA.....</u>	<u>52</u>
<u>CAPITULO 3. SELECCIÓN Y PRIORIZACIÓN DE CRITERIOS.....</u>	<u>53</u>
<u>3.1 SELECCIÓN DE CRITERIOS</u>	<u>54</u>
3.1.1 DISPONIBILIDAD DE LA MATERIA PRIMA:	54
3.1.2 CANTIDAD DE AGENTE REDUCTOR A UTILIZAR	55
3.1.3 CANTIDAD DE LODO GENERADO:.....	55
<u>3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA ENCUESTA PARA LOS EXPERTOS.....</u>	<u>56</u>
3.2.1ENCUESTA	56
<u>3.3 SELECCIÓN DE EXPERTOS.....</u>	<u>57</u>
3.3.1 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EXPERTOS.	57
3.3.2 SELECCIÓN DE LOS EXPERTOS.	57
<u>3.4 PRIORIZACIÓN DE CRITERIOS.....</u>	<u>59</u>
<u>CAPITULO 4. SELECCIÓN EXPERIMENTAL.....</u>	<u>61</u>
<u>4.1 ESTUDIO EXPERIMENTAL</u>	<u>62</u>
<u>4.2 ASPECTOS PRÁCTICOS DEL PROCESO.....</u>	<u>65</u>
<u>4.3 ELECCIÓN TEÓRICA DEL AGENTE REDUCTOR ACTIVO MÁS EFICIENTE.....</u>	<u>67</u>

CAPITULO 5. RESULTADOS ANP Y AHP 68

5.1 RESULTADOS DEL MODELO AHP..... 69

5.2 RESULTADOS DEL MODELO ANP..... 75

CAPITULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES 83

6.1 ANÁLISIS COSTO BENEFICIO 84

6.2 CONCLUSIONES 89

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del modelo ANP.....	34
Figura 2. Estructura de una decisión compleja	36
Figura 3. Esquema general ANP	39
Figura 4. Esquema general del proceso de reducción de Cr^{+6} a Cr^{+3}	45
Figura 5. Sección de pretratamiento y lavado. Cobrizado alcalino cianurado.....	46
Figura 6. Niquelado Electrolítico. Cromado Electrolítico.....	46
Figura 7. Recuperadores de cromado. Vertimiento de aguas provenientes del cromado.....	47
Figura 8. Piezas cromadas.....	47
Figura 9. Controladores de pH y REDOX - bombas dosificadoras.....	47
Figura 10. Reactor y filtro de arena	48
Figura 11. Descarga de lodos	48
Figura 12. Lodos para secado.....	48
Figura 13. Consumo comparativo .de los agentes reductores por Kg. de ácido crómico	86
Figura 14. Costo comparativo .de los agentes reductores por Kg. de ácido crómico.....	86
Figura 15. Costo comparativo .del lodo generado por Kg. de ácido crómico.....	87
Figura 16. Costo comparativo .del lodo generado por Kg. de ácido crómico.....	88
Figura 17. Costo total comparativo para reducir 1 Kg. de ácido crómico.	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Concentraciones máximas permisibles para verter a un cuerpo de agua y/o red de alcantarillado público.....	16
Tabla 2. Escala numérica para las preferencias verbales	28
Tabla 3. Ejemplos de aplicación de las evaluaciones multicriterio a la solución de problemas ambientales	40
Tabla 4. Agentes reductores más comunes de cromo hexavalentes	43

Tabla 5. Costo/disponibilidad de los agentes reductores.....	54
Tabla 6. Datos sobre el consumo de reactivos [].....	55
Tabla 7. Generación de lodos por kilogramo de CrO_3 Teórico [59].....	55
Tabla 8. Encuesta para los expertos	56
Tabla 9. Definición de los valores para el cálculo de n	58
Tabla 10. Valoración y elección de los expertos.....	59
Tabla 11. Profesión y cargo de los expertos	60
Tabla 12. Encuesta priorización de criterios.....	60
Tabla 13. Parámetros de calidad de vertimiento que representan interés ambiental.....	62
Tabla 14. Sustancias de interés sanitario en el vertimiento	63
Tabla 15. Límites de detección del laboratorio.....	64
Tabla 16. Generación de lodos por kilogramo de CrO_3 Experimental.....	65
Tabla 17. Pesos de los criterios basados en las preferencias de los 7 expertos	71
Tabla 18. Calificaciones para construir la función de valor	72
Tabla 19. Función de valor para la cantidad de agente reductor.....	72
Tabla 20. Función de valor para la disponibilidad	72
Tabla 21. Función de valor para lodos generados	73
Tabla 22. Funciones de valor para cada criterio	73
Tabla 23. Pesos para la función de valor de la cantidad de agente reductor.....	74
Tabla 24. Pesos para la función de valor de la disponibilidad	74
Tabla 25. Pesos para la función de valor de la cantidad de lodos generado	74
Tabla 26. Suma de los valores obtenidos.....	75
Tabla 27. Ranking agente reductor con mejor resultado costo – beneficio.	84
Tabla 28. Costo comparativo de los agentes reductores para el ácido crómico.....	85

RESUMEN

Toda actividad desarrollada por el hombre tiene un impacto dentro y fuera de su entorno o sistema, la contaminación altera el equilibrio ecológico y puede destruir en forma definitiva la vida en los lugares afectados o biosistemas. En muchos países industrializados la conciencia ambiental es cada vez mayor y se sienten obligados a detener la destrucción de nuestro hábitat. Los diferentes sectores industriales se ven en la tarea de eliminar o minimizar los impactos negativos al ambiente con la implementación de prácticas de prevención de la contaminación o del tratamiento de los efluentes antes de ser vertidos al medio ambiente.

Las aguas residuales de las plantas galvánicas son uno de los desechos industriales inorgánicos de mayor poder contaminante por sus características tóxicas y corrosivas. Las impurezas que se pueden encontrar son numerosas, de naturaleza, concentración y tamaño diferente [1]. Las características tóxicas, principalmente en las aguas residuales del proceso de cromado, se deben a las concentraciones normalmente elevadas de ácidos y metales pesados. Además, la elevada acidez de dichas aguas confiere al desecho un fuerte poder corrosivo.

El objeto del tratamiento de las aguas de desperdicio de una planta de cromado, es producir un efluente satisfactorio y disponer de cualquier lodo o sólidos resultantes del tratamiento, con una instalación que se pueda operar a un costo mínimo [1].

Para remover el cromo hexavalente se debe recurrir a una primera etapa de reducción, seguida de una segunda etapa de formación del hidróxido de Cr^{+3} y, finalmente una sedimentación o filtración.

Los agentes reductores clásicos en la industria química son los usados para este caso en el que se suele recurrir a bióxido de azufre (SO_2), sulfito de sodio (Na_2SO_3), sulfato ferroso (FeSO_4), bisulfito de sodio (NaHSO_3) o meta-bisulfito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$). La correcta selección del agente reductor es fundamental para cumplir con los requerimientos de la autoridad ambiental y hacer del tratamiento una actividad económicamente viable.

Para la elección del mejor agente reductor se recurrió al uso de métodos de análisis de decisión multicriterio, que permiten modelar sistemas, mediante la combinación de diferentes indicadores de rendimiento para obtener un indicador definitivo por medio de métodos matemáticos. Se eligieron el método analítico jerárquico (Analytic hierarchy process AHP) y el método analítico de redes (analytical network process ANP). Ambos métodos admiten como entradas medidas actuales y opiniones subjetivas (precio, peso, sentimientos de satisfacción, preferencias) y producen como salida un ranking de preferencias y un índice de consistencia.

En el presente estudio se comparó el uso de diferentes reductores durante el tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de cromado; utilizando los modelos de toma de decisiones AHP y ANP, para ello se determinaron los criterios y sus pesos. Se hizo una selección del mejor reductor con base en el resultado de los modelos y un análisis costo beneficio.

Los métodos empleados, permiten modelar un sistema complejo y evitar excesivos costos en pruebas que pueden llegar a ser bastante contaminantes y elegir finalmente la

opción que sea mejor desde el punto de vista de varios criterios que el tomador de decisiones se ha fijado.

Finalmente mediante el empleo de las dos metodologías se logra seleccionar el mejor agente reductor, según los criterios seleccionados, para el tratamiento de aguas residuales industriales en una PTAR de cromado, reduciendo los tiempos, los costos de la decisión y el impacto ambiental del estudio.

El agente reductor seleccionado es el óptimo bajo los criterios usados en el presente estudio donde no se tuvo en cuenta el impacto ambiental de las reacciones de reducción. Por lo anterior se seleccionó el bióxido de azufre como mejor agente reductor aunque puede liberar gases tóxicos durante el proceso, pero produce la menor cantidad de lodos.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El ejercicio de las actividades del hombre dentro del desarrollo industrial genera subproductos como emisiones atmosféricas, vertimientos y residuos sólidos. La mayoría de éstos contribuyen al deterioro de la calidad del aire, agua y suelos donde son dispuestos [2]. La cultura ambiental promovida por las Corporaciones Autónomas Regionales y otras autoridades ambientales del país, así como la responsabilidad de cada empresario como ente generador de contaminación, hace necesaria una intervención sobre las líneas de producción, con el fin de mitigar los impactos que se generen sobre el medioambiente y de esta forma asegurar la sostenibilidad de los recursos ambientales renovables y de la actividad industrial [3].

Los industriales deben modificar los procesos productivos para que ayuden a reducir de manera sustancial los desperdicios y por consiguiente esto llevará a minimizar el tratamiento. Adicionalmente las políticas ambientales obligan a las autoridades competentes a cumplir con la legislación [4].

La mayor parte de las empresas están controlando las descargas de las aguas residuales de los electro-recubrimientos, pero hay muy pocas normas definitivas para la aceptación del agua de desperdicio. La severidad del perjuicio que se puede ocasionar varía con el volumen y toxicidad de los desperdicios producidos; la naturaleza de las aguas receptoras; y el flujo mínimo de la corriente natural [5]. Es difícil fijar requerimientos mínimos de descarga basados sobre el efecto de la cantidad total de desperdicios tóxicos producidos sobre el sistema receptor, en el caso de Bogotá se requiere que las instalaciones nuevas o ampliadas sean provistas con infraestructura adecuadas para el tratamiento de las aguas de desperdicio, cuyo diseño debe permitir que se cumpla con la resolución 3957 de 2009 y el Decreto 3930 de 2010.

Particularmente las plantas industriales donde se elaboran recubrimientos cromado con fines estéticos, decoración y cambios de color de distintos materiales son una de las principales fuentes de la contaminación de los recursos hídricos con cromo hexavalente [6]. Para hacer un efectivo control de los vertimientos de una planta de cromado es importante combinar la prevención del daño ambiental con el manejo de la descarga y el desarrollo de tecnologías que minimicen la descarga toxica [7].

GENERACION DE DESPERDICIOS

En forma aproximada, se puede suponer que todas las materias primas y sales metálicas (excluyendo los ánodos) que se compran para una planta de electro-recubrimiento, encuentran su camino hacia las aguas de desecho. En el caso del ácido crómico utilizado para el cromado puede considerarse perdido en gran parte ya que por arrastre las pérdidas de cromo pueden ser de 3 a 50 veces el del realmente depositado sobre una pieza. Otra parte del cromo se pierde por la efervescencia producida durante la reacción de electrodeposición del cromo. Las perdidas por aspersion o neblina en el cromado pueden llegar a ser del 10 al 25 % del ácido crómico empleado [8].

Cualquier reducción en estas fuentes de pérdidas se refleja directamente en la reducción de las cargas de material y en menores costos de operación para el tratamiento de los residuos, logrando una posterior reducción en los costos del proceso si se logran recuperar algunas de las sustancias químicas perdidas. [9].

Los materiales de desperdicio se originan en los baños de cromado y encuentran su camino al drenaje por uno de los siguientes medios [10]:

- descarga intencional,
- perdida accidental, derrame o fugas,

- vapor perdido en los sistemas de escape, humos de lavado,
- arrastre en el enjuagado,
- pérdidas en las limpiezas de los filtros y bombas

Después de que todas las mejoras necesarias para disminuir el desperdicio de materias químicas y reducir el uso de agua para enjuagar han sido puestas en operación, mediante el uso de la producción Más Limpia, debe hacerse una inspección cuantitativa para medir el flujo de cada fuente de desperdicio y determinar la concentración de contaminantes en cada una. Las aguas residuales del proceso de cromado se pueden mezclar con otras ácidas pero no deben ser mezcladas con las aguas residuales portadoras de cianuro ya que se pueden generar vapores nocivos para la salud [11].

La descarga de desagües municipales y efluentes industriales no tratados dentro de ríos y lagos, generalmente causan eutrofización, lo que conduce con frecuencia a un déficit de oxígeno y condiciones anaeróbicas. Este déficit de oxígeno causa la muerte de peces y cuando se alcanzan condiciones anaeróbicas, se forman compuestos mal olientes como el sulfuro de hidrógeno [12].

REQUERIMIENTOS LEGALES SOBRE LOS EFLUENTES EN COLOMBIA

De acuerdo con este principio, la legislación colombiana y en especial la distrital han adoptado medidas para el control de las descargas provenientes de usuarios, tanto domésticos como industriales, en las que imponen desde amonestaciones escritas hasta multas y cierre de la actividad que genera la contaminación ambiental. Tal normatividad incluye [13]:

1. Decreto 1594 de 1984, que reglamenta el uso del agua y el manejo de los residuos líquidos.

2. Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables y se organiza el Sistema Nacional Ambiental SINA. Específicamente, emplaza a los profesionales a manejar responsablemente los recursos, es decir, enmarcar su actividad dentro de los principios de producción ambientalmente sostenible (Título I, Artículo 1, Numeral 1, entre otros).
3. Decreto 901 de 1997, por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales.
4. Ley 373 de 1997, por la cual se establece el programa para uso eficiente y ahorro de agua.
5. Ley 388 de 1997.
6. Resolución 3957 de 2009, por la cual se establece la norma técnica para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el distrito capital, y que establece los valores máximos permisibles para los contaminantes descargados en los vertimientos.
7. Resolución 339 de 1999, por la cual se implementan en el Distrito Capital las unidades de contaminación hídrica, UCH1 y UCH2.
8. Resolución 1596 de 2001, por la cual se modifica la Resolución 1074 de 1997 respecto al valor máximo permisible para el parámetro SAAM.
9. Decreto 1443 del 7 de mayo de 2004.
10. Decreto 3440 del 21 de octubre de 2004, en el cual se modifica el artículo 3 del Decreto 3100, respecto al cobro de las tasas retributivas por los vertimientos puntuales.
11. Decreto 3930 de 2010 que establece las disposiciones relacionadas con el uso del recurso hídrico; el ordenamiento del recurso hídrico; y el control de los vertimientos al recurso hídrico, al suelo asociado a un acuífero y a los alcantarillados.

Tabla 1. Concentraciones máximas permisibles para verter a un cuerpo de agua y/o red de alcantarillado público

PARAMETRO	EXPRESADA COMO	NORMA (mg/l)
Arsénico	As (mg/l)	0.1
Bario	Ba (mg/l)	5.0
Cadmio	CD (mg/l)	0.02
Carbamatos	Agente activo	0.1
Cianuro	CN mg/l	1.0
Cinc	Zn (mg/l)	5.0
Cloroformo extracto de carbón	ECC (mg/l)	1.0
Cobre	Cu (mg/l)	0.25
Compuestos fenólicos	Fenol (mg/l)	0.2
Compuestos organoclorados	Concentración de agente activo	0.05
Cromo hexavalente	Cr + 6 (mg/l)	0.5
Cromo total	Cr total (mg/l)	1.0
DBOs	(mg/l)	800
Dicloroetileno	Dicloroetileno	1.0
Difenil policlorados	Concentración de agente activo	N.D
DQO	(mg/l)	1500
Grasas y Aceites	(mg/l)	100
Manganeso	Mn (mg/l)	1.0
Mercurio	Hg (mg/l)	0.02
Mercurio Orgánico	Hg (mg/l)	N.D
Níquel	Ni (mg/l)	0.5
PH	Unidades	5 - 9
Plata	Ag (mg/l)	0.5
Plomo	Pb (mg/l)	0.1
Selenio	Se (mg/l)	0.1
Sólidos Sedimentables	SS (ml/l)	2.0
Sólidos suspendidos totales	SST (mg/l)	600
Sulfuro de Carbono	Sulfuro de Carbono (mg/l)	1.0
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de Carbono (mg/l)	1.0
Tricloroetileno	Tricloroetileno (mg/l)	1.0
Temperatura	Grados Centígrados (c)	<30
Tensoactivos (SAAM)	(mg/l)	10

El tratamiento de las aguas residuales industriales por el fabricante que las produce, es actualmente un requerimiento en muchas partes del mundo y específicamente en Colombia [14]. Aunque el volumen de agua residual producida por la industria de los

electro-recubrimientos con cromo no es grande comparada con algunas otras industrias, los desperdicios contienen cantidades intolerables de materiales que son muy tóxicos, corrosivos para los drenajes y desagües, y perjudiciales para los procesos biológicos [15].

Las reglas y requerimiento locales varían ampliamente y en la mayor parte de los casos son un asunto particular para las autoridades concernientes. Las autoridades ambientales en Colombia dan libertad a los municipios para controlar su propia admisión de los desperdicios industriales en su planta de tratamiento para producir un efluente que a su vez cumpla con las normas estatales. En Bogotá se requiere que las nuevas plantas de cromado estén provistas con instalaciones adecuadas para el tratamiento de las aguas de desperdicio [5].

El industrial generalmente implementa sistemas de tratamiento de aguas residuales del proceso de cromado que utilizan los reactivos más económicos, pero que a su vez generan mayor cantidad de lodos que más adelante requerirán de otros tratamientos y cuyos costos se deben adicionar a los de la totalidad del sistema. Incluir entre los criterios de elección del sistema de tratamiento, la cantidad de lodos producidos y su costo de manejo permite hacer un análisis más profundo y completo de las posibles alternativas [16].

MODELOS PARA ANÁLISIS DE PROBLEMAS

La estimación y medición desempeña un papel muy importante en la evaluación de la viabilidad de un proyecto, analizar sus alternativas, predecir el desarrollo y determinar la cantidad de recursos necesarios. Una buena estimación es clave, y se encuentra acotada

por los costos de tiempo y dinero [17]. Un proceso de toma de decisión comprende de manera general los siguientes pasos:

- Análisis de la situación;
- Identificación y formulación del problema;
- Identificación de aspectos relevantes que permitan evaluar las posibles soluciones.
- Identificación de las posibles soluciones;
- Aplicación de un modelo de decisión para obtener un resultado global; y
- Realización de análisis de sensibilidad.

Para abordar una situación de un problema de toma de decisión en la que se presentan diversos objetivos o criterios que simultáneamente deben incorporarse, ha surgido la Metodología Multicriterio como sistema de ayuda a la decisión del ser humano [18].

“Los métodos de evaluación y decisión multicriterio comprenden la selección entre un conjunto de alternativas factibles, la optimización con varias funciones objetivo simultáneas, un agente decisor y procedimientos de evaluación racionales y consistentes” [19] que permiten reducir el costo y el tiempo modelando un sistema complejo.

Se utilizan especialmente para tomar decisiones frente a problemas que cobijan aspectos intangibles a evaluar. Sus principios se derivan de la Teoría de Matrices, Teoría de Grafos, Teoría de las Organizaciones, Teoría de la Medida, Teoría de las Decisiones Colectivas, Investigación de Operaciones y de Economía [20].

Los métodos de evaluación y decisión multicriterio no consideran la posibilidad de encontrar una solución óptima. En función de las preferencias del agente decisor y de

objetivos pre-definidos (usualmente conflictivos), el problema central de los métodos multicriterio consiste en [18]:

1. Seleccionar la(s) mejor(es) alternativas;
2. Aceptar alternativas que parecen "buenas" y rechazar aquellas que parecen "malas"; y
3. Generar una "ordenación" (ranking) de las alternativas consideradas (de la "mejor a la "peor"). Para ello han surgido diversos enfoques, métodos y soluciones.

Aquellos problemas en los que las alternativas de decisión son finitas se denominan problemas de decisión multicriterio discreta.

Los principales métodos de evaluación y decisión multicriterio discretos son: Análisis Jerárquico (AHP- The Analytic Hierarchy Process-) y proceso analítico en red (ANP- The Analytic Network Process).

La toma de decisiones ambientales es un proceso complejo que involucra compromisos y negociaciones entre valores en conflicto. La evaluación de impacto ambiental es el instrumento de decisión que obliga a los actores principales a realizar un análisis razonado de las acciones del proyecto y los factores ambientales que a corto y mediano plazo han de recibir los impactos, por esa razón se reafirma como un proceso destinado a mejorar el sistema de toma de decisiones, y está orientado a garantizar que las opciones de proyectos en consideración sean ambiental y socialmente sostenibles permitiendo seleccionar las alternativas que maximicen los beneficios y disminuyan los impactos no deseados [21].

Se puede afirmar que el análisis multicriterio es una herramienta que interpreta adecuadamente los mecanismos de evaluación que los expertos ambientales y los

encargados de tomar decisiones acostumbran a hacer, considerando la precisión de los efectos al medio ambiente y la frecuente carencia de información cuantitativa para su valoración, por lo que resulta viable su aplicación en la evaluación de impactos ambientales [21,22, 23].

En el presente trabajo se pretende comparar el uso de diferentes reductores durante el tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de cromado; utilizando los modelos de análisis multicriterio AHP y ANP para ello se determinaran los criterios y sus pesos. Se hará una selección del mejor reductor con base en el resultado de los modelos y un análisis costo beneficio, así como una comparación entre los resultados de ambos tipos de análisis, con el objetivo de comprobar que es posible tomar decisiones de un sistema complejo como lo es un PTAR utilizando un modelo de decisión multicriterio, sin necesidad de realizar pruebas que pueden resultar costosas y contaminantes.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y DECISIÓN MULTICRITERIO

1.1.1 El Proceso de Toma de Decisión

La estimación y medición desempeña un papel muy importante dentro de la evaluación de la viabilidad de un proyecto, analizar sus alternativas, predecir el desarrollo y determinar la cantidad de recursos necesarios. Una buena estimación es clave, y se encuentra acotada por los costos de tiempo y dinero. Un proceso de toma de decisión comprende de manera general los siguientes pasos [24]:

- Análisis de la situación;
- Identificación y formulación del problema;
- Identificación de aspectos relevantes que permitan evaluar las posibles soluciones.
- Identificación de las posibles soluciones;
- Aplicación de un modelo de decisión para obtener un resultado global; y
- Realización de análisis de sensibilidad.

Para abordar una situación de un problema de toma de decisión en la que se presentan diversos objetivos o criterios que simultáneamente deben incorporarse, ha surgido la metodología multicriterio como sistema de ayuda a la decisión del ser humano. "Los métodos de evaluación y decisión multicriterio comprenden la selección entre un conjunto de alternativas factibles, la optimización con varias funciones objetivo simultáneas y un agente decisor y procedimientos de evaluación racionales y consistentes" [25].

Se utilizan especialmente para tomar decisiones frente a problemas que cobijan aspectos intangibles a evaluar. Sus principios se derivan de la Teoría de Matrices, Teoría de Grafos, Teoría de las Organizaciones, Teoría de la Medida, Teoría de las Decisiones Colectivas, Investigación de Operaciones y de Economía [20].

Los métodos de evaluación y decisión multicriterio no consideran la posibilidad de encontrar una solución óptima. En función de las preferencias del agente decisor y de objetivos pre-definidos (usualmente conflictivos), el problema central de los métodos multicriterio consiste en [18]:

4. Seleccionar la(s) mejor(es) alternativas;
5. Aceptar alternativas que parecen “buenas” y rechazar aquellas que parecen “malas”; y
6. Generar una “ordenación” (ranking) de las alternativas consideradas (de la “mejor a la “peor”). Para ello han surgido diversos enfoques, métodos y soluciones.

Los problemas de decisión multicriterio discreta, que se utilizan para realizar una evaluación y decisión respecto de problemas que, por naturaleza o diseño, admiten un número finito de alternativas de solución, a través de [21]:

- Un conjunto de alternativas estable, generalmente finito (soluciones factibles que cumplen con las restricciones- posibles o previsibles); se asumen que cada una de ellas es perfectamente identificada, aunque no son necesariamente conocidas en forma exacta y completa todas sus consecuencias cuantitativas y cualitativas;
- Una familia de criterios de evaluación (atributos, objetivos) que permiten evaluar cada una de las alternativas (analizar sus consecuencias), conforme a los pesos (o ponderaciones) asignados por el agente decisor y que reflejan la importancia (preferencia) relativa de cada criterio;

- Una matriz de decisión o de impactos que resumen la evaluación de cada alternativa conforme a cada criterio; una valoración (precisa o subjetiva) de cada una de las soluciones a la luz de cada uno de los criterios; la escala de medida de las evaluaciones puede ser cuantitativa o cualitativa, y las medidas pueden expresarse en escalas cardinal (razón o intervalo), ordinal, nominal, y probabilística;
- Una metodología o modelo de agregación de preferencias en una síntesis global; ordenación, clasificación, partición o jerarquización de dichos juicios para determinar la solución que globalmente recibe las mejores evaluaciones;
- Un proceso de toma de decisiones (contexto de análisis) en el cual se lleva a cabo una negociación consensual entre los actores o interesados (analista- "experto"-, decisor y usuario)"

A continuación se explica en detalle los métodos de decisión multicriterio discretos: Análisis Jerárquico (AHP- The Analytic Hierarchy Process-) y proceso analítico en red (ANP- The Analytic Network Process).

1.2 ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP- THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS-PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO)

Este método fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty y consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un Modelo Jerárquico. El propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un

Modelo Jerárquico que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas [26].

Una vez construido el Modelo Jerárquico, se realizan comparaciones de a pares entre dichos elementos (criterios-subcriterios y alternativas) y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por las personas, entregando una síntesis de las mismas mediante la agregación de esos juicios parciales. El fundamento del proceso de Saaty descansa en el hecho que permite dar valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende [26].

Para estas comparaciones se utilizan escalas de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad, sobre la base de una escala numérica propuesta por el mismo Saaty, que va desde 1 hasta 9. Una vez obtenido el resultado final, el AHP permite llevar a cabo el análisis de sensibilidad [27].

El AHP, mediante la construcción de un modelo jerárquico, permite de una manera eficiente y gráfica organizar la información respecto de un problema, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizar. El AHP se fundamenta en [28]:

- La estructuración del modelo jerárquico (representación del problema mediante identificación de meta, criterios, subcriterios y alternativas);
- Priorización de los elementos del modelo jerárquico;
- Comparaciones binarias entre los elementos;
- Evaluación de los elementos mediante asignación de "pesos";
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados;
- Síntesis;
- Análisis de Sensibilidad.

El AHP es una herramienta metodológica que ha sido aplicada en varios países para incorporar las preferencias de actores involucrados en un conflicto y/o proceso participativo de toma de decisión. Dentro de las posibilidades de aplicaciones de la herramienta están entre otras [28]:

- Formulación de políticas;
- Priorización Cartera de Proyectos;
- Gestión Ambiental;
- Análisis costo beneficio; y
- Formulación de Estrategias de Mercado.

Algunas de las ventajas del AHP frente a otros métodos de Decisión Multicriterio son [29,30]:

- Presentar un sustento matemático;
- Permitir desglosar y analizar un problema por partes;
- Permitir medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común;
- Incluir la participación de diferentes personas o grupos de interés y generar un consenso;
- Permitir verificar el índice de consistencia y hacer las correcciones, si es del caso;
- Generar una síntesis y dar la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad; y
- Ser de fácil uso y permitir que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

1.2.1 Base matemática del AHP [30]

“El AHP trata directamente con pares ordenados de prioridades de importancia, preferencia o probabilidad de pares de elementos en función de un atributo o criterio común representado en la jerarquía de decisión. Creemos que este es el método natural

(pero refinado) que la gente siguió al tomar decisiones mucho antes que se desarrollaran funciones de utilidad y antes que se desarrollara formalmente el AHP” (Thomas Saaty, 1998).

“El AHP hace posible la toma de decisiones grupal mediante el agregado de opiniones, de tal manera que satisfaga la relación recíproca al comparar dos elementos. Luego toma el promedio geométrico de las opiniones. Cuando el grupo consiste en expertos, cada uno elabora su propia jerarquía, y el AHP combina los resultados por el promedio geométrico” (Thomas Saaty, 1998).

El AHP, pide a quien toma las decisiones señalar una preferencia o prioridad con respecto a cada alternativa de decisión en términos de la medida en la que contribuya a cada criterio. Teniendo la información sobre la importancia relativa y las preferencias, se utiliza el proceso matemático denominado síntesis, para resumir la información y para proporcionar una jerarquización de prioridades de las alternativas, en términos de la preferencia global.

Las comparaciones pareadas son bases fundamentales del AHP. El AHP utiliza una escala subyacente con valores de 1 a 9 para calificar las preferencias relativas de los dos elementos. En la tabla 1 se presentan las calificaciones numéricas que se recomiendan para las preferencias verbales expresadas por el decisor. Investigaciones anteriores han determinado que está es una escala razonable para distinguir las preferencias entre dos alternativas

Tabla 2. Escala numérica para las preferencias verbales

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Con la jerarquía y la escala verbal ya bien definidas, se pasa a obtener la matriz de juicios o judgement matrix. Es en esta etapa donde entra en juego el juicio experto. El experto, basándose en la escala verbal, debe hacer comparaciones por parejas en cada nivel de la jerarquía, e ir anotándolos en la matriz. La matriz de juicios es de tamaño $n \times n$, siendo n el número de alternativas de las que se dispone. Cada celda de la matriz de juicios contiene un valor a_{ij} , que representa el tamaño relativo de la entidad i respecto del de la entidad j . Los elementos de la matriz se definen como se muestra en la figura. Si la entidad i es a_{ij} veces mayor (o menor) que la entidad j , entonces la entidad j es $1/a_{ij}$ veces menor (o mayor) que la entidad i . Teniendo en cuenta esta premisa y que la diagonal de la matriz sólo tiene como valor la unidad, no haría falta calcular todos los valores de la matriz. Sólo es necesario calcular una mitad de la matriz, ya sea la parte superior a la diagonal o la inferior.

$$A^{n \times n} = \left\{ \begin{array}{l} a_{ij} = \frac{s_i}{s_j} \text{ como de grande o pequeña es la entidad } i \text{ respecto a la entidad } j \\ a_{ij} = 1 \text{ la entidad } i \text{ y } j \text{ son de la misma proporción} \\ a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \text{ Son inversamente proporcionales} \end{array} \right\}$$

$$A^{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Se cumple que

$a_{ij} \times a_{ji} = 1$, entonces

$$A^{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \frac{1}{a_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{n1}} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Los axiomas del AHP son:

Axioma 1: Referido a la condición de juicios recíprocos: Si A es una matriz de comparaciones pareadas se cumple que $a_{ij} = 1/a_{ji}$

Axioma 2: referente a la condición de homogeneidad de los elementos: Los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud o jerarquía

Axioma 3: referente a la condición de estructura jerárquica o estructura dependiente de reaprovechamiento. Existe dependencia jerárquica en los elementos de dos niveles consecutivos

Axioma 4: Referido a la condición de expectativas de orden de rango: Las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas.

A la hora de hacer las comparaciones por parejas, es necesaria la colaboración del experto y al menos una entidad de referencia o reference task de la que se conozca su magnitud real de proyectos anteriores. Las proporciones de la entidad de referencia son las primeras que se han de situar en la matriz. Es importante que la proporción de esta entidad no ocupe los valores extremos de la escala verbal, sino que se sitúe más o

menos hacia la mitad de la escala. De esta manera se minimizan los posibles prejuicios introducidos en la matriz de juicios. Otra posibilidad, con el mismo objetivo, radica en introducir más de una entidad de referencias repartidas uniformemente en la escala verbal.

En este punto, con una matriz de juicios por cada criterio a tener en cuenta en la toma de decisión, se calcula la escala de proporción o ratio scale. La escala de proporción es un vector r en el que cada posición del vector contiene un valor proporcional a la entidad i en relación al criterio elegido. También se calcula el índice de inconsistencia o inconsistency index. Este índice proporciona una medida de cómo de lejos está la estimación de la consistencia perfecta. Una matriz de juicios perfectamente consistente es aquella en la que todos sus elementos satisfacen

$$a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik} \quad \forall i, j, k$$

Como procedimiento para calcular la escala de proporción y el índice de inconsistencia, se propone la utilización del modelo propuesto por Eduardo Miranda en [1], por sencillez y buenos resultados. Hay que calcular la media geométrica v_i de cada fila de la matriz de juicios definida para un determinado criterio. El valor de v_i viene dado por:

$$v_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}$$

La escala de proporción, denominada vector de valores propios o eigen value, r , consiste en un vector en el que cada valor se calcula aplicando

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_n] \text{ con } r_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^n v_j}$$

El índice de inconsistencia se puede calcular de la siguiente forma

$$CI = \frac{\sqrt{\sum_{i=j}^n \sum_{j>i}^n \left(\ln a_{ij} - \ln \frac{v_i}{v_j} \right)^2}}{\frac{(n-1) \times (n-2)}{2}}$$

A partir del vector de valores propios o eigen value y el valor real de la entidad de referencia, se puede calcular el valor absoluto de cada entidad. Para ello se debe aplicar la expresión

$$Valor_i = \frac{r_i}{r_{referencia}} \times Valor_{referencia}$$

Aplicando estos cálculos con el resto de criterios, previamente ordenados según el porcentaje de contribución sobre el proyecto en su totalidad, se puede calcular el valor de cada alternativa

1.3 ANÁLISIS EN RED (ANP- THE ANALYTIC NETWORK PROCESS)

Aunque el AHP es conceptualmente fácil de utilizar, su estricta estructura jerárquica no puede abordar la complejidad de muchos problemas reales. Como solución, Saaty propuso en el 2001 el ANP, la generalización del AHP [31].

De esta forma, el ANP es una herramienta matemática, que a través de una estructura de red, permite evaluar diferentes alternativas en escenarios en los que se deben tener en cuenta múltiples criterios para su elección, tanto cualitativos como cuantitativos, con el fin, de darle solución a un problema representado. Esta herramienta, a diferencia de los demás métodos pertenecientes a la teoría de la decisión, además de evaluar las diferentes alternativas posibles de elección, permite analizar la relación de dependencia

entre las alternativas, entre los criterios de un mismo nivel, o de los criterios con respecto a las alternativas. Esta particularidad, hace que el ANP sea más objetivo y permita desarrollar el problema de una forma más natural [32].

La estructura de Red en la que se basa el modelo ANP, permite que las influencias se transmitan de un clúster a otro, y de regreso, mediante un clúster intermedio, o de forma inmediata. En este modelo, aunque el componente debe influenciar los criterios de evaluación, también depende a su vez de la naturaleza del problema, que los criterios influyeran también en las alternativas de decisión.

Para establecer la relación de influencias de la herramienta, El modelo ANP está basado en una estructura de decisión compleja, que a su vez, presenta los siguientes elementos [33]:

- *Criterios Estratégicos*: son objetivos individuales de quien toma la decisión, que siempre necesitan ser satisfechos, se encuentran en el nivel superior y se pueden organizar de forma Jerárquica o en red.
- *Méritos*: son cuatro: los beneficios, las oportunidades, los costos y los riesgos. Cada uno tiene una estructura de decisión separada con sus criterios de control y/o redes de decisión.
- *Criterios de Control*: Es un criterio que se puede tener en mente cuando se hace la evaluación de la relaciones de la subred que contienen. Los criterios y subcriterios de control sirven como base para hacer todas las comparaciones, tanto para los componentes como para sus elementos
- *Redes de Decisión*: están descritas por las relaciones entre los elementos y las alternativas de decisión que se incluirán en el modelo. Por lo tanto, las formas que pueden tomar las redes de decisión en un ANP son múltiples y dependen de la estructura y de la óptima elección de los elementos y las alternativas.

Dentro de esta metodología se pueden distinguir los siguientes conceptos [30]:

- *Beneficio*: ganancia, ventaja o valor producto de tomar una decisión.
- *Oportunidades*: Son las ventajas potenciales o futuras, ganancias o valores positivos que pueden resultar al tomar una decisión.
- *Costo*: Valor o desventaja en la que se incurre al tomar una decisión.
- *Riesgos*: Son las desventajas potenciales o futuras, pérdidas o valores negativos que pueden resultar al tomar una decisión.
- *BOCR*: Sigla que acuña a las palabras beneficios, oportunidades, costos y riesgos.
- *Elemento*: Es una sola fuente de influencia en una decisión, que siempre debe pertenecer a un componente en una estructura de red. Los elementos deben ser criterios útiles para la evaluación de alternativas.
- *Componente*: Conjunto de elementos que comparten una característica en común, lo que los hace homogéneos.
- *Alternativa*: es el posible resultado a darse al tomar una decisión, representándose en un objeto físico, una estrategia o una acción.
- *Criterio*: Es un atributo o una condición que una alternativa debe satisfacer.
- *Criterio estratégico*: Es un criterio usado para evaluar los beneficios, oportunidades, costos y riesgos de una decisión.
- *Meta*: Es el objetivo general o global de una decisión.
- *Jerarquía*: una estructura multinivel usada para representar una decisión, estructura compuesta así:
 - Nivel superior, se encuentra la meta de la decisión.
 - Nivel de criterios
 - Nivel de sub-criterios
 - Alternativas de decisión, que siempre deben ir en el nivel inferior.

Las influencias en una jerarquía son lineales y los arcos dirigidos apuntan en dirección de abajo hacia arriba.

- *Prioridad*: Valor relativo de importancia que sirve para clasificar criterios y alternativas.
- *Red*: Estructura que representa una decisión sin ordenamiento de niveles. Las influencias no son lineales y pueden ir en dirección de un grupo de elementos a otros, y puede volver directamente o a través de un ciclo que pase por otros grupos de elementos.
- *Clúster*: Se refiere a un componente.

1.3.1 Estructura del modelo [20,34]

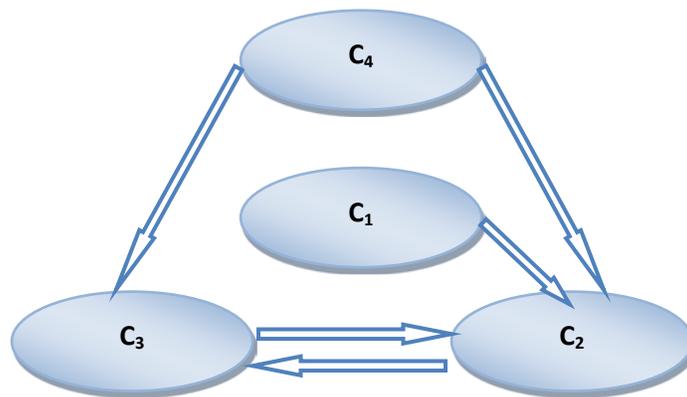


Figura 1. Estructura del modelo ANP

La estructura de Red en la que se basa el modelo ANP, permite que las influencias se transmitan de un cluster a otro, y de regreso, mediante un cluster intermedio, o de forma inmediata. El bucle dibujado en la imagen, representa la existencia de una dependencia interna. En el modelo ANP, aunque el componente debe influenciar los criterios de evaluación, también depende a su vez de la naturaleza del problema, que los criterios influyan también en las alternativas de decisión.

1.3.2 Estructura de una decisión compleja [34]

Para establecer la relación de influencias de la herramienta, El modelo ANP está basado en una estructura de decisión compleja, que a su vez, presenta los siguientes elementos:

- *Criterios Estratégicos:* son objetivos individuales o de la organización que toma la decisión, que siempre necesitan ser satisfechos, se encuentran en el nivel superior y se pueden organizar de forma Jerárquica o en red.
- *Méritos:* son cuatro: los beneficios, las oportunidades, los costos y los riesgos. Cada uno tiene una estructura de decisión separada con sus criterios de control y/o redes de decisión.
- *Criterios de Control:* Es un criterio que se puede tener en mente cuando se hace la evaluación de la relaciones de la subred que contienen. Los criterios y subcriterios de control sirven como base para hacer todas las comparaciones, tanto para los componentes como para sus elementos.
- *Redes de Decisión:* están descritas por las relaciones entre los elementos y las alternativas de decisión que se incluirán en el modelo. Por lo tanto, las formas que pueden tomar las redes de decisión en un ANP son múltiples y dependen de la estructura y de la óptima elección de los elementos y las alternativas.

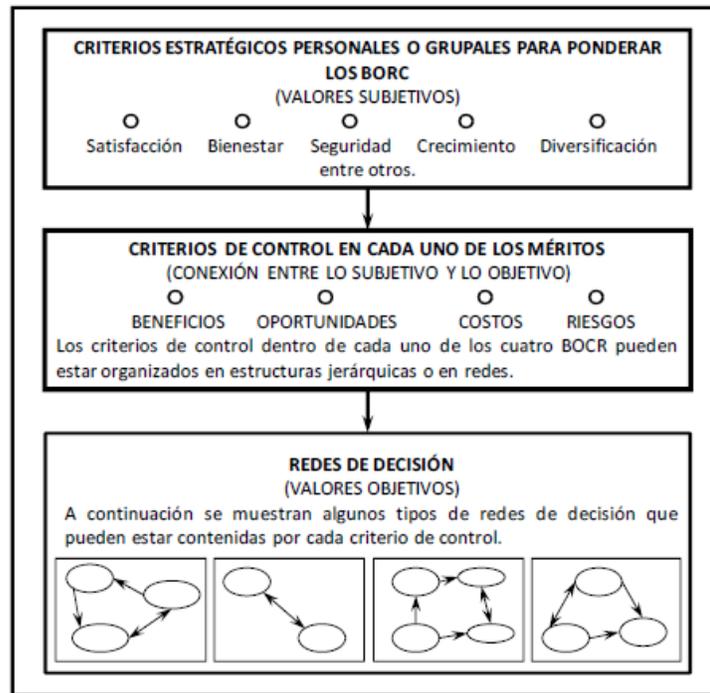


Figura 2. Estructura de una decisión compleja Figura tomada de Saaty T.L, 2001, pág. 185

Es importante resaltar que no todos los modelos del ANP siguen la estructura de una decisión compleja, algunas veces los problemas se puede modelar sólo con una red de decisión, si este tipo de estructura le da más sentido al problema.

1.3.3 Tipos de Comparación [35]

A continuación, se decide la aproximación que se quiere seguir para hacer la comparación por pares, influenciar o ser influenciado y se determina la cantidad de matrices de comparación por pares que se van a realizar, lo que depende de las relaciones de influencias establecidas en un comienzo.

1.3.4 Metodología de implementación del ANP [36]

A continuación, se describen la serie de pasos a seguir para la implementación del ANP:

- Paso 1. Describir el problema de decisión en detalle, incluyendo sus objetivos, criterios y subcriterios, actores y sus objetivos, las posibles alternativas y las relaciones de influencias.
- Paso 2. Establecer los criterios de control y los subcriterios de las jerarquías de control de cada uno de los méritos de la decisión, para obtener sus prioridades a partir de matrices de comparación por pares. Si un criterio o subcriterio de control tiene una prioridad global de 3% o menos, se debería considerar eliminarlo.
- Paso 3. Determinar el conjunto de clusters y los elementos que son relevantes para todos los criterios de control.
- Paso 4. Para cada criterio de control o subcriterio determinar el conjunto de clusters y sus elementos, y conectarlos de acuerdo al sentido de las influencias.
- Paso 5. Determinar la aproximación a seguir en el análisis de cada cluster o elemento, influenciar otros clusters o elementos con respecto a un criterio, o ser influenciado por otros clusters o elementos.
- Paso 6. Construir la supermatriz para cada criterio de control situando los clusters en el orden que fueron numerados junto con sus elementos, verticalmente a la izquierda y horizontalmente en la parte superior. Ingresar en la posición apropiada las prioridades derivadas de la comparación por pares como subcolumnas de las correspondientes columnas de la supermatriz. Las columnas representan los clusters y las subcolumnas los elementos que pertenecen a cada cluster.
- Paso 7. Realizar comparaciones por pares de los elementos dentro de cada cluster de acuerdo con sus relaciones de influencia.

- Paso 8. Realizar comparaciones por pares de los clusters cuando estos influyeran cada cluster al cual están conectados con respecto a un criterio de control dado. Usar los pesos derivados para ponderar los elementos del correspondiente bloque de columnas de la supermatriz. Asignar cero cuando no exista la influencia. De esta manera obtener la supermatriz estocástica ponderada.
- Paso 9. Calcular las prioridades límite elevando la supermatriz estocástica ponderada a la n-ésima potencia. Los resultados posibles son dos: en el primero, las columnas de la matriz son idénticas y cada fila representa la prioridad relativa de los elementos a la izquierda de la matriz; en el segundo, la matriz se comporta de forma cíclica en bloques y los diferentes límites deben ser sumados y promediados, y nuevamente normalizados a uno para cada cluster.
- Paso 10. Sintetizar las prioridades límite de las alternativas de cada uno de las subredes contenidas dentro de los criterios o subcriterios de control. Igualmente, obtener las prioridades de estos criterios o subcriterios de control normalizadas por los clusters, normalizar otra vez pero solamente teniendo en cuenta las prioridades de los criterios y subcriterios de control que pertenezcan a un mismo mérito y que tengan subredes debajo de éstos. Multiplicar cada vector que contenga las prioridades límite de las alternativas por la prioridad del criterio o subcriterio de control correspondiente, finalmente sumar los vectores resultantes. Debe tener cuatro vectores, uno para beneficios, otro para costos, otro para riesgos y otro para oportunidades.
- Paso 11. Determinar los criterios estratégicos y sus prioridades para ordenar los cuatro méritos. Normalizar los cuatro *ratings* obtenidos y usarlos para obtener la síntesis general de los 4 vectores. Para cada alternativa, restar la suma del costo y del riesgo ponderado de la suma ponderada de los costos y los beneficios, también puede sumar los recíprocos de los costos y los riesgos ponderados, o sumar uno menos los costos y uno menos los riesgos ponderados.

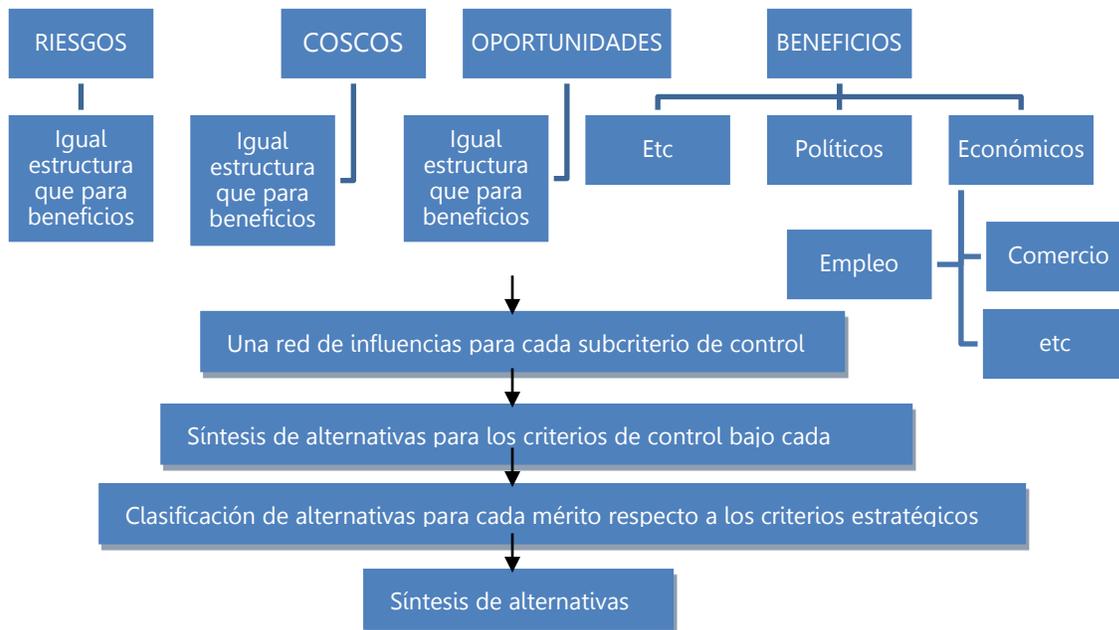


Figura 3. Esquema general ANP

1.4 EL USO DE METODOS DE EVALUACION MULTICRITERIO EN PROBLEMAS AMBIENTALES

Las aplicaciones multicriterio en problemas medioambientales, como se muestra a continuación, constituyen un campo emergente de investigación y desarrollo en la materia. [37].

A continuación se muestra que es un campo de trabajo investigativo que va creciendo en los últimos años en el campo de la resolución de problemas ambientales. Esto se puede estar dando debido a que los problemas del medio ambiente, son complejos y requieren de un análisis minucioso y no siempre se encuentra una sola respuesta, sino un conjunto de ellas que pueden proporcionar la mejor herramienta para su gestión y

esto se encuentra en los métodos de de evaluación multicriterio, que son capaces de modelar sistemas complejos.

Tabla 3. Ejemplos de aplicación de las evaluaciones multicriterio a la solución de problemas ambientales

Investigación	Autores	Año	Método empleado
A multiple criteria evaluation of sustainable agricultural development models using AHP	Rezaei-Moghaddam, K, & EKarami.	2008	Analytic Hierarchy Process (AHP)
Fuzzy AHP Assessment of Water Management Plans	Srdjevic, B. & Yvonilde D	2008	Analytic Hierarchy Process (AHP) - Fuzzy extent method
Applying the grey assessment to the evaluation system of ecological green space on greening projects in Taiwan.	Lin, Li-Wei, et al	2008	Analytic Hierarchy Process (AHP)
Population viability risk management (PVRM) for in situ management of endangered tree species--A case study on a <i>Taxus baccata</i> L.	Dhar, A et al.	2008	Analytic Hierarchy Process (AHP)
Restoration of abandoned agricultural lands toward habitats for umbrella species.	Olexandr N, & Marriaza.	2009	Analytic Hierarchy Process (AHP) - Fuzzy extent method
Spatial analysis of the suitability of olive plantations for wildlife habitat restoration.	Olexandr N, Arriaza, M. & Álvarez, J.	2009	Analytic Hierarchy Process (AHP)- Geographical Information Systems (GIS)
La medición de la sostenibilidad en la industria de la madera en Europa. Un enfoque multicriterio basado en la agregación de indicadores	Voces, R, Díaz, L & Romero, C	2009	Técnicas de programación por metas con variables binarias
Spatial analysis of the suitability of olive plantations for wildlife habitat restoration.	Olexandr N, Arriaza, M. & Álvarez, J.	2009	Analytic Hierarchy Process (AHP)- Geographical Information Systems (GIS)
A comparative analysis of the sustainability of rice cultivation technologies using the analytic network process	E. Reig, J. Aznar, Vicente Estruch	2010	analytic network process

1.5 EL AGUA COMO BIOSISTEMA

Un biosistema se define como cualquier organismo vivo o sistema complejo de criaturas vivientes [38]. De acuerdo a Bertalanffy (1976) un sistema es un conjunto de elementos que interactúan [39]. Para Johansen (1982), un sistema es "un conjunto de partes coordinadas y en interacción para alcanzar objetivos, estas partes forman un todo que se encuentran bajo la influencia de fuerzas en relación definidas" [40]. Para Bunge (1980), un sistema es un objeto complejo cuyas partes o componentes están relacionados de tal modo, que el objeto se comporta como una unidad y no como un conjunto [41].

Un sistema biológico no es solo una asociación de células que cumplen en su conjunto una función básica de un organismo; es la presencia de muchos sistemas especializados. La función de cada sistema es el producto de las propiedades básicas de las células que lo forman [42,43,44].

Las comunidades de animales, vegetales y microorganismos que viven en un determinado medio y las relaciones de dependencia, alimentación y desarrollo que existe entre ellos forman un biosistema. La tierra es un enorme biosistema que incluye en su interior biosistemas pequeños, como: montañas, bosques, mares, lagos, entre otros [45, 46, 47].

El agua es el biosistema que sostiene la vida y el ambiente; conecta a la gente, culturas y economías. El agua es indispensable para todo desarrollo económico y social, seguridad alimentaria y para disminuir la pobreza y el hambre. Es esencial también para alcanzar los objetivos de desarrollo del milenio y otros acuerdos internacionales [48].

En la actualidad el mundo está viviendo los más grandes cambios globales, como el rápido crecimiento de la población mundial, migraciones sin control y urbanismo subnormal, nuevo uso de suelo, economías en expansión, clima, todos ellos tienen un

impacto negativo sobre el recurso hídrico. Todos estos cambios globales ponen en serio peligro la disponibilidad y calidad del agua además de que promueve la sobre-extracción [49].

El manejo del agua es un tema de preocupación mundial debido al uso indiscriminado que se ha hecho de este recurso natural lo cual trae aparejado la pérdida de la diversidad biológica y los biosistemas, con un peligro inminente para el deterioro del planeta. Por todo ello es necesario educar a la población en general, y en particular a los que directa o indirectamente pueden influir en él [50].

Es obligación de los gobiernos y organizaciones internacionales, generar una visión común y un marco para desarrollar y manejar los recursos hídricos de manera sustentable y que garantice el acceso de agua potable para todos [51] Los recursos hídricos no pueden ser manejados sin una apropiada capacitación e infraestructura, invertir en esas áreas debe ser la más alta prioridad [52].

En los procesos de electro-recubrimiento el agua es uno de los recursos más utilizados, en especial durante las etapas de enjuague y lavado de piezas. De donde salen contaminadas por la dispersión de desechos metálicos y orgánicos procedentes sales y aditivos. Su tratamiento y depuración constituyen el gran reto ecológico de los últimos años por la afectación a los Biosistemas [53,54]

1.6 TRATAMIENTO QUIMICO DE LOS DESECHOS DE CROMO HEXAVALENTE

Una característica importante de las industrias de cromado es que la gran mayoría son de pequeño tamaño (menos de 50 trabajadores) y suelen disponer de pocos recursos técnicos y económicos. Esto es un serio inconveniente para la modernización y el futuro de las empresas, y se traduce directamente en una indiferencia hacia aquellos aspectos

de la producción que supongan costos adicionales, como el tratamiento de las aguas residuales. En general, las aguas residuales producidas por las industrias de este sector se caracterizan por presentar bajos contenidos en materia orgánica, aunque su gran problemática es la presencia de Cr^{+6} que es altamente tóxico [55].

El cromo disuelto en los efluentes de las plantas de cromado se encuentra en la forma hexavalente (Cr^{+6}) que es un estado altamente oxidado. Con esta valencia el cromo se presenta como ion cromato (CrO_4^{-2}) y como ion dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$), la abundancia relativa de una u otra en estas formas depende del pH del efluente. El ion dicromato prevalece por debajo de pH 7 y se transforma en ion cromato por encima de este valor, ambos son muy estables dentro de estos rangos de pH [56].

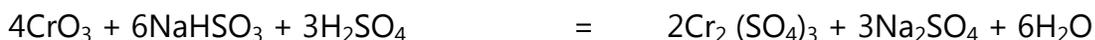
La reducción del Cr^{+6} se presenta por la reacción química de la solución con un reductor, previa adición de ácido sulfúrico, reduciendo de esta forma a Cr^{+3} . Luego por neutralización se obtiene el hidróxido crómico $\text{Cr}(\text{OH})_3$, que se forma al elevar el pH de la solución anterior con un agente neutralizante, que finalmente con la adición de un agente floculador se obtiene la separación sólido - líquido, para la obtención de una solución clara carente de este contaminante [57]. Los agentes reductores de mayor utilización a nivel mundial, para el tratamiento del cromo hexavalente, son [1, 8]:

Tabla 4. Agentes reductores más comunes de cromo hexavalentes

AGENTE REDUCTOR	FORMULA
BISULFITO DE SODIO	NaHSO_3
METABISULFITO DE SODIO	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$
SULFITO DE SODIO	Na_2SO_3
HIDROSULFITO DE SODIO	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$
SULFATO FERROSO	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
DIÓXIDO DE AZUFRE	SO_2

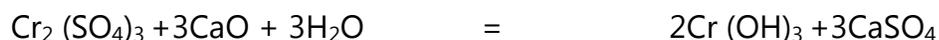
Pasos para el Tratamiento con los reductores [1,8]

La primera reacción de este proceso es la reducción, el Cr^{+6} a su valencia Cr^{+3} , con el agente reductor en un medio ácido dado por H_2SO_4 , para facilitar la reacción.



Es importante mantener un pH ácido (para asegurar la solubilidad del cromo, formando el ácido crómico), entre pH 2 y 3. Como es habitual, los potenciales de óxido reducción (POR o Eh) cambian bruscamente al agotarse la especie oxidante o la especie reductora (es una función logarítmica). En consecuencia, la dosificación del agente reductor se puede realizar manteniendo el POR que refleje una casi total conversión de Cr^{+6} a Cr^{+3} . Este POR será del orden 200 a 300 mV pero cambia al cambiar el pH (unos 150 mV por unidad de pH).

En la reacción de neutralización que es consecutiva a la primera etapa, se lleva a cabo una reacción de doble desplazamiento químico en la cual el radical hidroxilo formado por la adición de cal al agua, desplaza al cromo Cr^{+3} que proviene de la primera reacción, obteniéndose una sal de cromo en forma de hidróxido crómico $\text{Cr}(\text{OH})_3$, la reacción es la siguiente:



La tercera etapa de esta proceso es la sedimentación del hidróxido crómico formado que es altamente insoluble, este proceso se puede acelerar mediante la adición de un

agente floculante aniónico, en este proceso las partículas finas se floculan formando aglomerados de mayor volumen y peso, el comportamiento fisicoquímico de estas partículas finas se desarrolla por la adherencia de unas tras otras, a través de las cargas positivas que presentan al unirse con las cargas negativas del floculante, por lo tanto, el sedimento va tomando mayores dimensiones y de esta manera caen por gravedad en la base del reactor y de esta forma se garantiza la separación sólido líquido.



Debido a la baja solubilidad del hidróxido crómico y su alta capacidad de fijación, se puede concluir que se trata de una sustancia que debidamente dispuesta sobre un terreno natural, y bien acondicionado es inocua, pues no provoca alteraciones al medio ambiente. Además la oxidación del Cr^{+3} a Cr^{+6} por el oxígeno del aire es muy improbable debido que el potencial de oxidación es muy elevado, lo que hace que el hidróxido sea un compuesto estable. En Figura 4, se representa el proceso anteriormente descrito, además se muestran algunas fotografías de una planta de cromado, tomadas en la empresa Zintepec Ltda ubicada en Bogotá D.C.

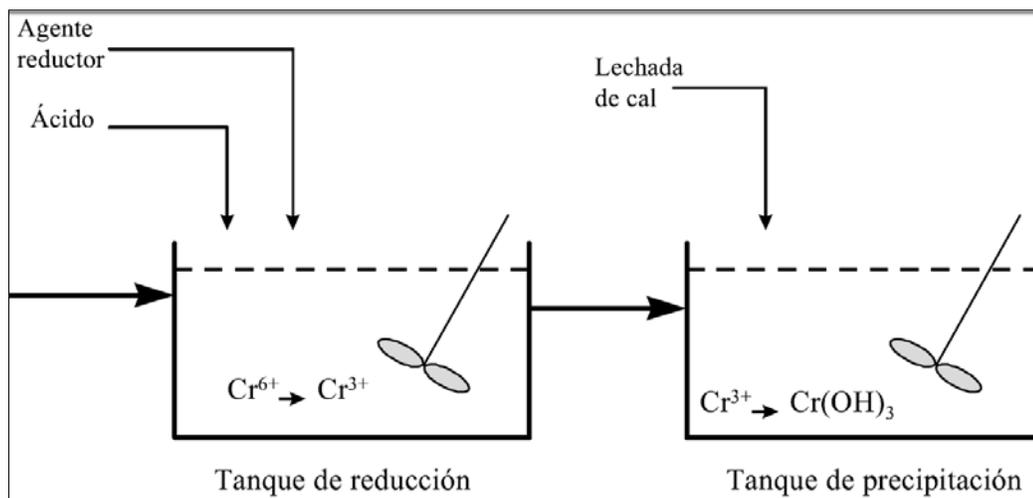


Figura 4. Esquema general del proceso de reducción de Cr^{+6} a Cr^{+3}



Figura 5. Sección de pretratamiento y lavado. Cobrizado alcalino cianurado.



Figura 6. Niquelado Electrolítico. Cromado Electrolítico



Figura 7. Recuperadores de cromado. Vertimiento de aguas provenientes del cromado



Figura 8. Piezas cromadas



Figura 9. Controladores de pH y REDOX - bombas dosificadoras



Figura 10. Reactor y filtro de arena



Figura 11. Descarga de lodos



Figura 12. Lodos para secado

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo general

Seleccionar el o los agentes reductores más eficientes para el tratamiento de aguas residuales industriales en una PTAR de cromado utilizando la metodología ANP y AHP.

2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar los criterios críticos para la selección del agente reductor más eficiente desde la parte económica y ambiental.
- Realizar una elección teórica del agente reductor activo más eficiente.
- Seleccionar el agente reductor activo más eficiente por medio de la metodologías ANP y AHP.
- Comparar los resultados teóricos, con los arrojados por la aplicación de las metodologías ANP y AHP.

2.2 HIPÓTESIS

Las metodologías ANP y AHP permiten considerar problemas de decisión con múltiples objetivos y con información cuantitativa y cualitativa para tomar decisiones sobre un sistema complejo como lo es una planta de tratamiento de aguas residuales de cromado y seleccionar el o los agentes reductores más eficientes para realizar el tratamiento, disminuyendo los costos y el tiempo que tomaría un estudio experimental.

2.3 METODOLOGIA

Se realizará una selección de criterios fundamentales para la elección del agente reductor a utilizar en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de cromado. Una vez definidos los criterios, se debe construir una encuesta que se les aplicará a expertos en el tema de manejo de vertimientos, para que ellos a partir de su experticia seleccionen los agentes reductores idóneos. Para seleccionar los expertos se empleara la metodología utilizada por varios autores como: Febles A. 2003 [58] y López, M; San Miguel, G; Argilagos, S. 2008 [59].

El análisis multicriterio posibilita la participación de los actores involucrados en un problema mediante la elección de los criterios de evaluación en un marco de amplia participación social además permite la calificación directa de las distintas alternativas de elección por parte de los actores [60]. Con la ayuda de los expertos se realizará la priorización de criterios, que permita que finalmente se realice la elección del agente reductor activo más eficiente utilizando las metodologías de ANP Y AHP.

Los resultados del modelo AHP y del ANP, se compararan entre si y posteriormente con los arrojados por la elección teórica del agente reductor activo más eficiente. Para comparar y demostrar que se puede utilizar cualquiera de las dos metodologías de decisión multicriterio propuestas por Tomas Saaty, lo que permite reducir costos, el tiempo y la contaminación generada en la selección del agente reductor más eficiente, mediante la modelación del Sistema de tratamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de cromado y la selección de criterios fundamentales para la elección del agente reductor.

CAPÍTULO 3

SELECCIÓN Y PRIORIZACIÓN DE CRITERIOS

3.1 SELECCIÓN DE CRITERIOS

Partiendo del conocimiento del sistema de una planta de tratamiento de aguas residuales de cromado, se seleccionan los siguientes criterios, que se tienen en cuenta a la hora de elegir el agente reductor más eficiente para el tratamiento de aguas residuales industriales en este tipo de industria, sin incurrir en elevados costos y reduciendo la contaminación al ambiente. En el sector galvanico la selección tradicional se hace con base en el precio y la cantidad de agente reductor a utilizar.

3.1.1 DISPONIBILIDAD DE LA MATERIA PRIMA:

Es importante para el proceso asegurar que los proveedores de la materia prima la tengan disponible para despacho, sino, esto representaría un factor limitante para la operación de la planta de tratamiento. En la siguiente tabla se resume la disponibilidad y costo de los diferentes agentes reductores.

Tabla 5. Costo/disponibilidad de los agentes reductores

PRODUCTO	PROVEEDOR							
	Distribuidora De Químicos Industriales S.A		Distribuidora De Químicos Industriales S.A, Producto Chino		Rodaquímicos		Químicos Campota	
	Precio Unitario (\$/Kg.)	D	Precio Unitario (\$/Kg.)	D	Precio Unitario (\$/Kg.)	D	Precio Unitario (\$/Kg.)	D
Dióxido de azufre	1200	I	1300	I	1300	8 d	0	ND
Bisulfito de sodio	1950	I	1650	I	2000	I	2200	I
Sulfito de sodio	2450	I	2700	30d	2650	8 d	2350	I
Metabisulfito de sodio	1950	I	3600	2 d	2250	1 d	3200	2 d
Hidrosulfito de sodio	4850	I	2550	I	4600	I	4400	I
Sulfato ferroso	1180	I	1350	30 d	1500	8 d	1500	I

3.1.2 CANTIDAD DE AGENTE REDUCTOR A UTILIZAR

Según la estequiometría de la reacción de reducción y la eficiencia de la reacción a temperatura ambiente la cantidad de agente reductor por kg de CrO_3 cambia, y esto tiene un efecto significativo en la eficiencia y costo del proceso. En la siguiente tabla se resumen los consumos de los agentes reductores y de los demás reactivos utilizados en el proceso

Tabla 6. Datos sobre el consumo de reactivos [61]

Agente Reductor	Bióxido de Azufre	Bisulfito de Sodio	Sulfito de Sodio	Metabisulfito de Sodio	Sulfato Ferroso	Hidrosulfito de Sodio
	SO_2	NaHSO_3	Na_2SO_4	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$	$\text{FeSO}_4 - 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$
Kg. Reactivo por Kg. CrO_3	1.93	3.12	3.78	2.86	16.7	3.28
Kg. H_2SO_4 por Kg. CrO_3	0	1.48	2.94	1.48	5.88	2.4 NaOH
Kg. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por Kg. CrO_3	2.88	2.88	2.88	2.88	4.44	-----

3.1.3 CANTIDAD DE LODO GENERADO:

Al variar el agente reductor, cambia el ambiente del sistema y se genera una cantidad distinta de lodos, este es un factor importante porque estos lodos requieren una disposición especial y a mayor cantidad, se aumentan los costos del proceso. En la siguiente tabla se presenta el valor teórico según la estequiometría de la reacción de los lodos producidos con cada agente reductor.

Tabla 7. Generación de lodos por kilogramo de CrO_3 Teórico [59]

Agente Reductor	Bióxido de Azufre	Bisulfito de Sodio	Sulfito de Sodio	Metabisulfito de Sodio	Sulfato Ferroso	Hidrosulfito de Sodio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	3.07 Kg.	3.07 Kg.	3.07 Kg.	3.07 Kg.	13.46 Kg.	-----
$\text{Na}(\text{OH})$	1.03 Kg.	1.03 Kg.	1.03 Kg.	1.03 Kg.	4.23 Kg.	1.03 Kg.

3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA ENCUESTA PARA LOS EXPERTOS

Con base en los criterios que definen la eficiencia de cada agente reductor, se construye la encuesta que deberán responder los expertos y que definirá los valores de los pesos de cada criterio para usarlos en los modelos ANP y AHP. El uso de expertos permite que se una el conocimiento que tiene el equipo investigador del presente trabajo, con el que tienen diferentes expertos, permitiendo de esta forma que se haga una mejor selección de criterios, partiendo de la base que se logra una mayor comprensión del sistema sobre el cual se quiere tomar decisiones, que para el caso es una PTAR de cromado

3.2.1 ENCUESTA

Para los criterios de selección de los agentes reductores más eficientes para el tratamiento de aguas residuales industriales en una PTAR de cromado

De las siguientes parejas, seleccione el criterio que usted considera más importante.

CALIFIQUE DE 1 A 9 ASÍ:

1: iguales

3 o 1/3: moderadamente fuerte.

5 o 1/5: fuerte

7 o 1/7: muy fuerte

9 o 1/9: extremadamente fuerte

Tabla 8. Encuesta para los expertos

CRITERIO VS CRITERIO	RESULTADO
Cantidad agente reductor activo – Disponibilidad del agente reductor	
Cantidad agente reductor activo – Cantidad de lodo producido	
Disponibilidad del agente reductor – Cantidad de lodo producido	

3.3 SELECCIÓN DE EXPERTOS

3.3.1 Determinación del número de expertos.

Uno de los métodos para calcular el número óptimo de expertos es el desarrollado por Cyret y March, 1965 [62], y posteriormente empleados en otras investigaciones como las realizadas por Febles A. 2003[58] y López, M; San Miguel, G; Argilagos, S. 2008 [59], este consta de los pasos siguientes [60]:

- Fijación por el analista de los datos siguientes:
 - i : nivel de precisión.
 - p : proporción del error.
 - k : constante fijada a partir del nivel de confianza.
 - Con dicha información se determina el número preliminar de expertos (n) para un nivel de confianza del 99%.
- Estimación por el analista del tamaño de la población de expertos (N) que pueden existir en general
- Se analiza el cumplimiento de la condición $n > 0,5 N$
- De cumplirse la condición anterior, el número de expertos que serán consultados se calcula aplicando la expresión:

$$n = \frac{\left[N \left(\frac{i^2}{k} \right) + N(p - p^2) \right]}{N \left(\frac{i^2}{k} \right) + p - p^2}$$

3.3.2 Selección de los expertos.

La calidad de los expertos influye decisivamente en la exactitud y confiabilidad de los resultados y en ello interviene la calificación técnica, los conocimientos específicos sobre el objeto a evaluar y la posibilidad de decisión entre otros. Existen varios procedimientos

para objetivar la selección de expertos, uno de ellos es el basado en el auto evaluación de los expertos. Este método consiste en calcular el coeficiente de competencia K . Para calcularlo se tiene en cuenta la autovaloración del experto acerca de su competencia o poder de decisión en el tema, K_c (Coeficiente de conocimiento). Y las fuentes que le permiten argumentar sus criterios K_a (Coeficiente de argumentación) [63].

$$K = \frac{K_c + K_a}{2}$$

Donde

K_c : escala de 0 a 10 multiplicado por 0.1, "0" indica no tener ningún conocimiento

K_a : Evaluación del experto en *alto, medio, bajo*

A continuación se describe como se seleccionaron los expertos con base en las ecuaciones anteriormente descritas. Se tuvo en cuenta que los expertos tuvieran un amplio conocimiento práctico sobre la operación de las PTAR en las plantas de cromado y vasto conocimiento sobre el proceso. Los expertos consultados tienen más de 10 años de experiencia en la operación de estas plantas. Se definieron los siguientes valores para determinar el número óptimo de experto, con base en los reportados en la literatura para estudios similares

Tabla 9. Definición de los valores para el cálculo de n

i	0.05
p	0.09
K, para un 99% de confianza	6.6564
N	10

Según el número de plantas de tratamiento en funcionamiento actualmente en las industrias de cromado se puede determinar que el número preliminar de expertos es de 8 y se estimó que el tamaño de la población de expertos que cumpla con las características anteriormente descritas es de 10, al por lo que se cumple $8 > 0,5(10)$.

Al realizar el cálculo del número óptimo de expertos con los valores y ecuación anteriormente descritas se obtuvo que $n = 7$ expertos.

A continuación se detalla el cálculo del valor K para cada experto consultado, basado en una autoevaluación realizada por ellos y en la asignación del k_a según la evaluación realizada, como alta 1, media 0.7 y baja 0.3 con base en estos resultados se eligieron los 7 expertos mejor calificados (mayor valor de K)

Tabla 10. Valoración y elección de los expertos

EXPERTO	K_a	K_c	K
E1	1	0.9	0.95
E2	1	0.8	0.9
E3	1	0.9	0.95
E4	1	0.85	0.925
E5	0.7	0.9	0.8
E6	0.7	0.8	0.75
E7	0.7	0.9	0.8
E8	0.7	0.75	0.725
E9	0.3	0.8	0.55
E10	0.3	0.9	0.6

3.4 PRIORIZACIÓN DE CRITERIOS

Después de la elección de los expertos se procedió a aplicar la encuesta para realizar la priorización de los criterios importantes para elegir el agente reductor más eficiente. A continuación se especifican las profesiones y los cargos de los expertos consultados.

Tabla 11. Profesión y cargo de los expertos

EXPERTO	PROFESION	CARGO
E1	Administradora de Empresas	Jefe de planta de metalizados.
E2	Tecnólogo químico	Jefe de producción planta de cromo duro
E3	Ingeniero químico	Asesor en diseño de PTAR
E4	Tecnólogo químico	Jefe de línea de cromado
E5	Administrador de empresas	Gerente general planta de cromado
E6	Ingeniera ambiental	Jefe de control de calidad planta de cromado
E7	Cromador	Jefe de línea de cromado

En la siguiente tabla se resumen los resultados de las encuestas

Tabla 12. Encuesta priorización de criterios

Criterio Vs Criterio	EXPERTOS						
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
Cantidad agente reductor activo – Disponibilidad del agente reductor	3/1	5/1	3/1	3/1	1/7	1	1/7
Cantidad agente reductor activo – Cantidad de lodo producido	7/1	3/1	1/3	1/3	1	1/9	1/5
Disponibilidad del agente reductor – Cantidad de lodo producido	1	3/1	1/5	3/1	1/3	1/7	3

Según estos resultados, no hay un consenso entre los expertos sobre si es más importante la cantidad de agente reductor activo usado o la disponibilidad de este. Pero es claro que para todos es más importante evaluar la cantidad de lodo producido que la cantidad de agente reductor activo usado. Los expertos tienen diferentes criterios sobre si la disponibilidad del agente reductor o la cantidad de lodo producido es más importante, pero hay una leve inclinación a darle mayor importancia a la cantidad de lodo producido.

CAPÍTULO 4

SELECCIÓN EXPERIMENTAL

4.1 ESTUDIO EXPERIMENTAL

A continuación se resume en tablas los resultados obtenidos de los experimentos realizados en el laboratorio de metalizados de la compañía High Lights S.A.; y de datos obtenidos y promediados de dos PTAR que colaboraron con este estudio, planta de cromado de High Lights S.A y plata de cromado de Zintepec Ltda. Inicialmente se presentan los datos de calidad de agua obtenidos después del tratamiento con los diferentes agentes reductores y se comparan con la norma ambiental vigente. Los análisis se realizaron con las metodologías desarrolladas por cada una de las empresas en sus laboratorios y esta información es de carácter restringido.

Tabla 13. Parámetros de calidad de vertimiento que representan interés ambiental

PARÁMETRO	Máx. norma (Res.SDA 3957/09)	Metabisulfito de Sodio	Bióxido de Azufre	Bisulfito de Sodio	Sulfito de Sodio	Sulfato Ferroso	Hidrosulfito de Sodio
Caudal medio de vertimiento (L/s)	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Potencial de Hidrógeno, pH (Und)	5-9	6,15 – 7,06	6,15 – 7,06	6,24 – 7,18	6,07 – 7,21	6,13 – 7,08	6,05 – 7,00
Temperatura (°C)	30	19	19	20	21	18	21
Sólidos Sedimentables (mL/L-h)	2	0,1	<0,01	<0,01	0,21	0,31	0,41
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	600	5	<5	<5	<5	<5	<5
Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días, DBO ₅ (mg O ₂ /L)	800	164	184	241	237	309	187
Demanda Química de Oxígeno, DQO (mg O ₂ /L)	1500	650	650	730	675	833	590

Grasas y Aceites (mg/L)	100	6	<6	<6	<6	<6	<6
Tensoactivos aniónicos S.A.A.M. (mg/L)	10	1,70	1,67	1,85	3,67	2,76	1,80

Tabla 14. Sustancias de interés sanitario en el vertimiento

SUSTANCIAS ORGÁNICAS							
PARÁMETRO (mg/L)	Máx. norma (Res.SDA 3957/09)	Metabisulfito de Sodio	Bióxido de Azufre	Bisulfito de Sodio	Sulfito de Sodio	Sulfato Ferroso	Hidrosulfito de Sodio
Hidrocarburos totales – T.P.H.	20	0,39	0,41	0,45	0,38	0,43	0,35
Fenoles	0,2	0,07	0,09	0,05	0,10	0,10	0,10
SUSTANCIAS INORGÁNICAS							
Aluminio	10	1	<1	<1	1	1	<1
Hierro	10	0,32	0,39	0,30	0,42	0,34	0,30
Cianuros	1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Sulfuros	5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,4
Manganeso	1	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.
Boro	5	0,1	0,08	0,05	0,16	0,23	0,51
METALES PESADOS							
Arsénico	0,1	N.R.	N.R.	0,1	N.R.	0,08	0,08
Bario	5	N.R.	N.R.	4	N.R.	4	3
Cadmio	0,02	0,017	0,015	0,017	0,015	0,013	0,018
Cobre	0,25	0,05	0,08	<0,05	0,08	0,07	0,06
Cromo	0,5	0,02	0,04	<0,02	0,09	0,02	0,09
Cromo total	1	0,16	0,32	0,016	0,18	0,16	0,16
Mercurio	0,02	N.R.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Níquel	0,5	0,07	0,10	0,12	0,23	0,18	0,27
Plata	0,5	0,06	0,43	0,34	0,21	0,32	0,33
Plomo	0,1	0,02	0,07	0,02	0,02	0,03	0,05
Selenio	0,1	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.
Zinc	2	0,32	0,93	0,70	0,53	0,12	0,07
Molibdeno	10	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.

Tabla 15. Límites de detección del laboratorio

PARÁMETRO	LÍMITE DE DETECCIÓN DEL MÉTODO (mg/L)
Aluminio	1,0
Hierro	0,11
Cianuros	0,001
Sulfuros	1,0
Boro	0,04
Hidrocarburos totales	0,08
Cromo	0,06
Cromo hexavalente	0,02
DBO ₅	2
DQO	6
Fenoles	0,07
Grasas y Aceites	6
Plomo	0,02
Sólidos suspendidos totales	5
Sulfuros	1,0
Tensoactivos	0,07

Con base en estos resultados, se puede concluir que con cualquiera de los agentes reductores se cumplen las disposiciones ambientales de la resolución 3957 de 2009.

A continuación se resumen los resultados experimentales sobre la cantidad de lodos producidos en el tratamiento, con los diferentes agentes reductores, en la Tabla 7 se mostraron los valores teóricos según la estequiometría de la reacción. La prueba se realizó al final del tratamiento fisicoquímico en la planta Zintepec Ltda, pasando los lodos por un filtro prensa para posteriormente pesarlos.

Tabla 16. Generación de lodos por kilogramo de CrO_3 Experimental

Agente Reductor	Bióxido de Azufre	Bisulfito de Sodio	Sulfito de Sodio	Metabisulfito de Sodio	Sulfato Ferroso	Hidrosulfito de Sodio
Ca(OH)_2	4.03 Kg.	4.52 Kg.	4.37 Kg.	4.60 Kg.	17.60 Kg.	----- ---
Na(OH)						2.02 Kg.

Se puede observar que cuando se usa bióxido de azufre como agente reductor es cuando se generan menos lodos y cuando se usa el sulfato ferroso la cantidad de lodos generada es sumamente alta. El sulfito de sodio en todas sus formas produce cantidades de lodos muy similares. De acuerdo a los resultados experimentales se observa que la cantidad de lodo generada por kg de CrO_3 es superior entre un 25 y 30% al valor teórico basado en la estequiometría de la reacción, esto se debe a que se pueden presentar reacciones simultáneas que generen lodos adicionales.

4.2 ASPECTOS PRÁCTICOS DEL PROCESO

Los agentes reductores más populares son el sulfato ferroso y el bióxido de azufre, este último es más barato que el sulfato ferroso. El metabisulfito de sodio es un poco más costoso pero es más estable que los dos primeros. Los agentes de tipo sulfito no producen lodo adicional, pero el uso de sulfato ferroso crea una carga adicional de lodo. Los gases generados con la reacción usando el bióxido de azufre son nocivos y corrosivos y deben ser extraídos. Los agentes reductores tipo sulfito son preferibles a menos que en el desperdicio de la planta se disponga de la mitad de las necesidades de sulfato ferroso.

El método de tratamiento integral se puede aplicar a la destrucción del cromato en dos formas: una operación en dos tanques que consiste en la reducción en un medio ácido, seguida por la neutralización y precipitación del cromo trivalente, o una operación en un tanque en la cual se reduce el cromo hexavalente en un medio alcalino con hidrosulfito de sodio. Se escoge el primer método porque es más económico de operar debido a que el costo del hidrosulfito es bastante elevado; y es necesario en el segundo método una adición continua y controlada de NaOH para mantener un pH alcalino y satisfacer la reacción de precipitación.

En el método ácido más usual de dos pasos se prefiere el bióxido de azufre como agente reductor, debido a que no se consume ácido en la reacción y los cambios en el pH son mínimos. Se prefiere un pH de alrededor de 3 en el depósito para obtener una reacción rápida, el SO₂ es introducido usualmente por medio de un inyector controlado manualmente. Se mantiene un exceso de 20 a 50 ppm de SO₂ que se puede controlar manualmente por medio de papeles de comprobación.

En el segundo enjuague del tratamiento, se mantiene un exceso de hidróxido de sodio que se controla con bombas de dosificación y controladores de potencial de oxidoreducción. El hidróxido crómico que se precipita se podrá reunir en el depósito cónico y es transportado como un lodo húmedo al filtro prensa donde se seca para luego ser entregado a la empresa encargada de disponerlos como desechos peligrosos.

4.3 ELECCIÓN TEÓRICA DEL AGENTE REDUCTOR ACTIVO MÁS EFICIENTE

En la práctica es común el uso del hidrosulfito de sodio, pero con base en el estudio experimental, La disponibilidad de los reactivos y el costo (Tabla 5) se puede concluir que el bióxido de azufre sería el agente reductor más beneficioso, por costo, disponibilidad, cantidad usada y cantidad de lodos producidos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS ANP Y AHP

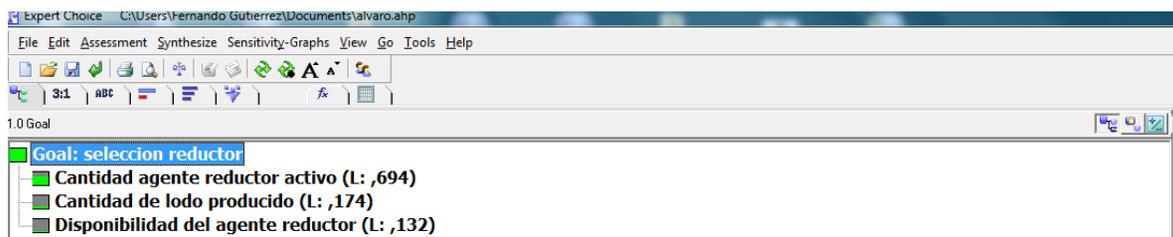
5.1 RESULTADOS DEL MODELO AHP

Para hacer los cálculos relacionados con el modelo que permiten elegir el agente reductor más eficiente con base en la encuesta realizada a los expertos previamente seleccionados (Tabla 12).

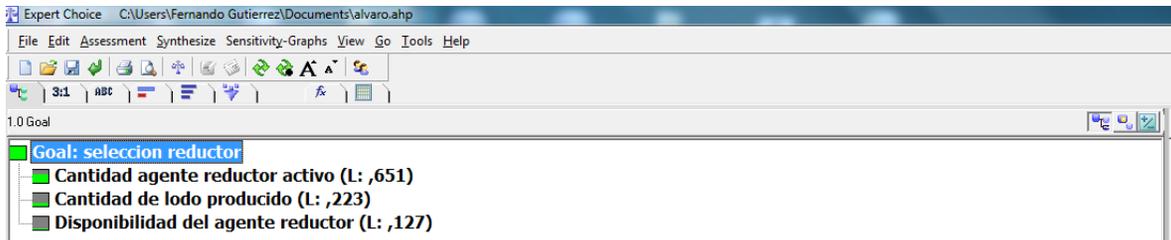
Se usó el software *EXPERT CHOICE* que es un sistema para el análisis, síntesis y justificación de decisiones y evaluaciones complejas. Hace posible mirar los elementos de un problema en forma aislada: un elemento se compara contra otro con respecto a un criterio. Este es el proceso de decisión reducido a sus términos más sencillos: comparaciones apareadas. Expert Choice ayuda a estructurar un problema (de modo de focalizar sus elementos), a ordenar sus juicios, y a sintetizar y combinar todos los juicios de modo de priorizar claramente sus alternativas de mejor a peor. Expert Choice permite incorporar tanto factores cualitativos como cuantitativos para luego combinarlos [64].

A Continuación se presentan los resultados obtenidos con el modelo.

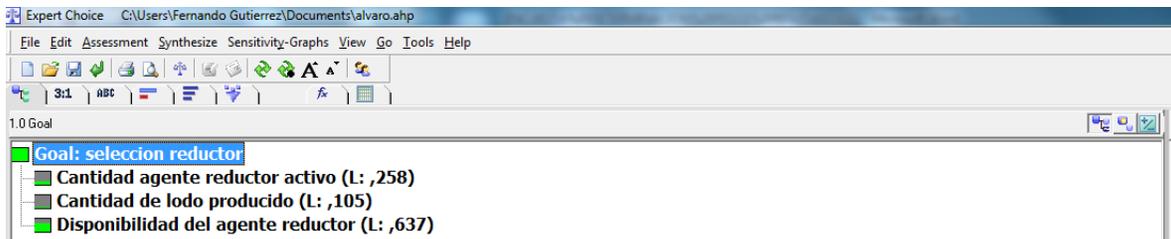
Resultados Experto 1



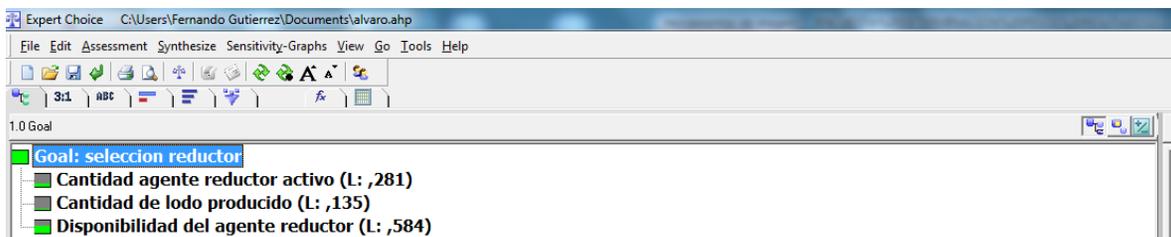
Resultados Experto 2



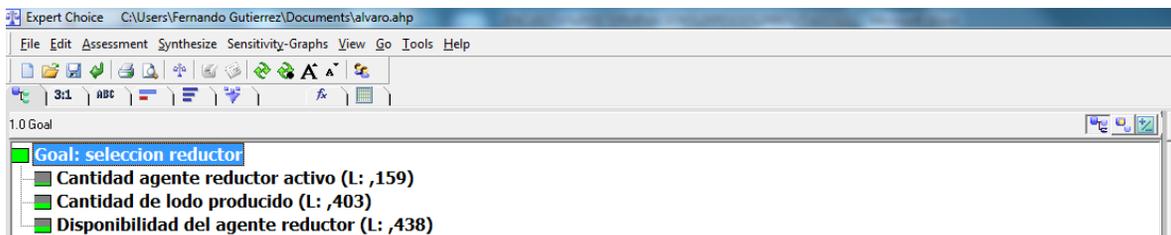
Resultados Experto 3



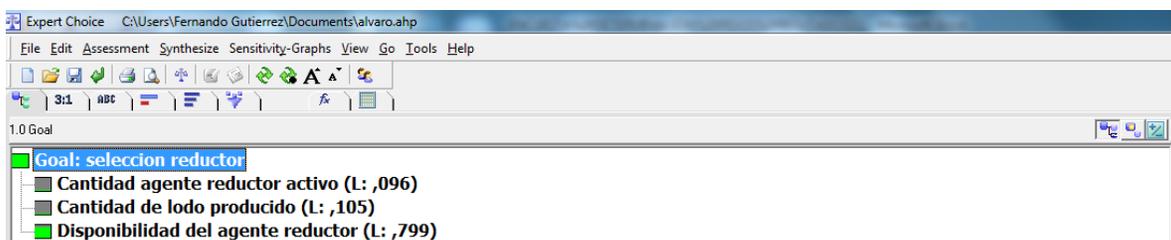
Resultados Experto 4



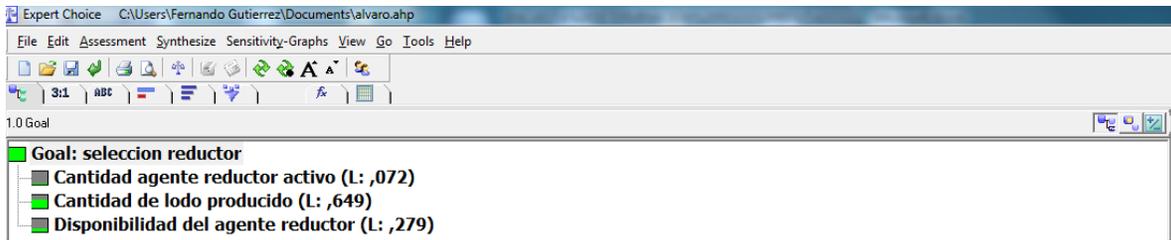
Resultados Experto 5



Resultados Experto 6



Resultados Experto 7



Con base en estos resultados se realiza el cálculo de los pesos a partir de la preferencia de los 7 expertos:

Tabla 17. Pesos de los criterios basados en las preferencias de los 7 expertos

	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	Promedio
Cantidad agente reductor activo	694	651	258	281	159	96	72	316
Cantidad de lodo producido	174	223	105	135	403	105	649	256
Disponibilidad del agente reductor	132	127	637	584	438	799	279	428
								1000

Una vez se tiene validados los indicadores, se procede a la construcción de funciones valor, lo cual permite pasar los valores de cada uno de los indicadores, los cuales son heterogéneos, a puntajes estandarizados adimensionales [65]; para finalmente realizar una agregación, mediante una sumatoria de cada uno de los puntajes homogéneos obtenidos para los indicadores por el peso específico de este, agregando así, todos los puntajes estandarizados a un puntaje total.

Esta metodología de construcción de funciones de valor para homogeneizar valores heterogéneos ha sido utilizada por algunos autores en estudios de carácter ambiental, como lo son: Munn, 1979 [66]; Canter, 1996 [67]; Gómez-Orea; 1996 [68]; Beinatz; 1997 [65]; Accorsi et al; 1999 [69]; Cloquell, 2003 [70]; Sánchez et al, 2005 [71].

La construcción de una función de valor es requerida cuando los incrementos en las variables medidas (indicadores), no proporcionan similares incrementos en el objetivo de la función Cloquell 2003 [70] y Gutiérrez, 2011 [72].

Tabla 18. Calificaciones para construir la función de valor

PARÁMETRO	CRITERIOS		
AGENTE REDUCTOR ACTIVO	CANTIDAD DE AGENTE REDUCTOR	DISPONIBILIDAD	LODOS GENERADOS
Bióxido de Azufre	1.00	0.17	0.65
Bisulfito de Sodio	0.65	1.00	0.33
Sulfito de Sodio	0.33	1.00	0.50
Metabisulfito de Sodio	0.65	0.50	0.17
Sulfato Ferroso	0.17	0.33	0.00
Hidrosulfito de Sodio	0.50	1.00	1.00

Tabla 19. Función de valor para la cantidad de agente reductor

AGENTE REDUCTOR ACTIVO	CANTIDAD DE AGENTE REDUCTOR	Función de Valor
Bióxido de Azufre	1.00	1
Bisulfito de Sodio	0.65	0.6
Metabisulfito de Sodio	0.65	0.6
Hidrosulfito de Sodio	0.50	0.5
Sulfito de Sodio	0.33	0.3
Sulfato Ferroso	0.17	0.1

Tabla 20. Función de valor para la disponibilidad

AGENTE REDUCTOR ACTIVO	DISPONIBILIDAD	Función de Valor
Bisulfito de Sodio	1.00	1
Hidrosulfito de Sodio	1.00	1
Sulfito de Sodio	1.00	1
Metabisulfito de Sodio	0.50	0.5
Sulfato Ferroso	0.33	0.3
Bióxido de Azufre	0.17	0.1

Tabla 21.Función de valor para lodos generados

AGENTE REDUCTOR ACTIVO	LODOS GENERADOS	Función de Valor
Hidrosulfito de Sodio	1.00	1
Bióxido de Azufre	0.65	0.6
Bisulfito de Sodio	0.33	0.3
Sulfito de Sodio	0.50	0.5
Metabisulfito de Sodio	0.17	0.2
Sulfato Ferroso	0.00	0.1

Ahora se calculan los pesos para cada una de las funciones de valor:

Tabla 22. Funciones de valor para cada criterio

AGENTE REDUCTOR ACTIVO	CANTIDAD DE AGENTE REDUCTOR	DISPONIBILIDAD	LODOS GENERADOS
Bióxido de Azufre	1	0.1	0.6
Bisulfito de Sodio	0.6	1	0.3
Sulfito de Sodio	0.3	1	0.5
Metabisulfito de Sodio	0.6	0.5	0.2
Sulfato Ferroso	0.1	0.3	0.5
Hidrosulfito de Sodio	0.5	1	1

Tabla 23. Pesos para la función de valor de la cantidad de agente reductor

AGENTE REDUCTOR ACTIVO	CANTIDAD DE AGENTE REDUCTOR	PESO 0.316
Bióxido de Azufre	1	0,316
Bisulfito de Sodio	0.6	0,1896
Sulfito de Sodio	0.3	0,0948
Metabisulfito de Sodio	0.6	0,1896
Sulfato Ferroso	0.1	0,0316
Hidrosulfito de Sodio	0.5	0,158

Tabla 24. Pesos para la función de valor de la disponibilidad

AGENTE REDUCTOR ACTIVO	DISPONIBILIDAD	PESO 0.256
Bióxido de Azufre	0.1	0,256
Bisulfito de Sodio	1	0,1536
Sulfito de Sodio	1	0,0768
Metabisulfito de Sodio	0.5	0,1536
Sulfato Ferroso	0.3	0,0256
Hidrosulfito de Sodio	1	0,128

Tabla 25. Pesos para la función de valor de la cantidad de lodos generado

AGENTE REDUCTOR ACTIVO	LODOS GENERADOS	PESO 0.428
Bióxido de Azufre	0.6	0,428
Bisulfito de Sodio	0.3	0,2568
Sulfito de Sodio	0.5	0,1284
Metabisulfito de Sodio	0.2	0,2568
Sulfato Ferroso	0.5	0,0428
Hidrosulfito de Sodio	1	0,214

Tabla 26. Suma de los valores obtenidos

AGENTE REDUCTOR ACTIVO	CANTIDAD DE AGENTE REDUCTOR PESO 0.316	DISPONIBILIDAD PESO 0.256	LODOS GENERADOS PESO 0.428	VALORES PARA CADA AGENTE
Bióxido de Azufre	0,316	0,256	0,428	1
Bisulfito de Sodio	0,1896	0,1536	0,2568	0,6
Sulfito de Sodio	0,0948	0,0768	0,1284	0,3
Metabisulfito de Sodio	0,1896	0,1536	0,2568	0,6
Sulfato Ferroso	0,0316	0,0256	0,0428	0,1
Hidrosulfito de Sodio	0,158	0,128	0,214	0,5

Con base en los resultados del modelo el agente reductor seleccionado fue el Bióxido de Azufre.

5.2 RESULTADOS DEL MODELO ANP

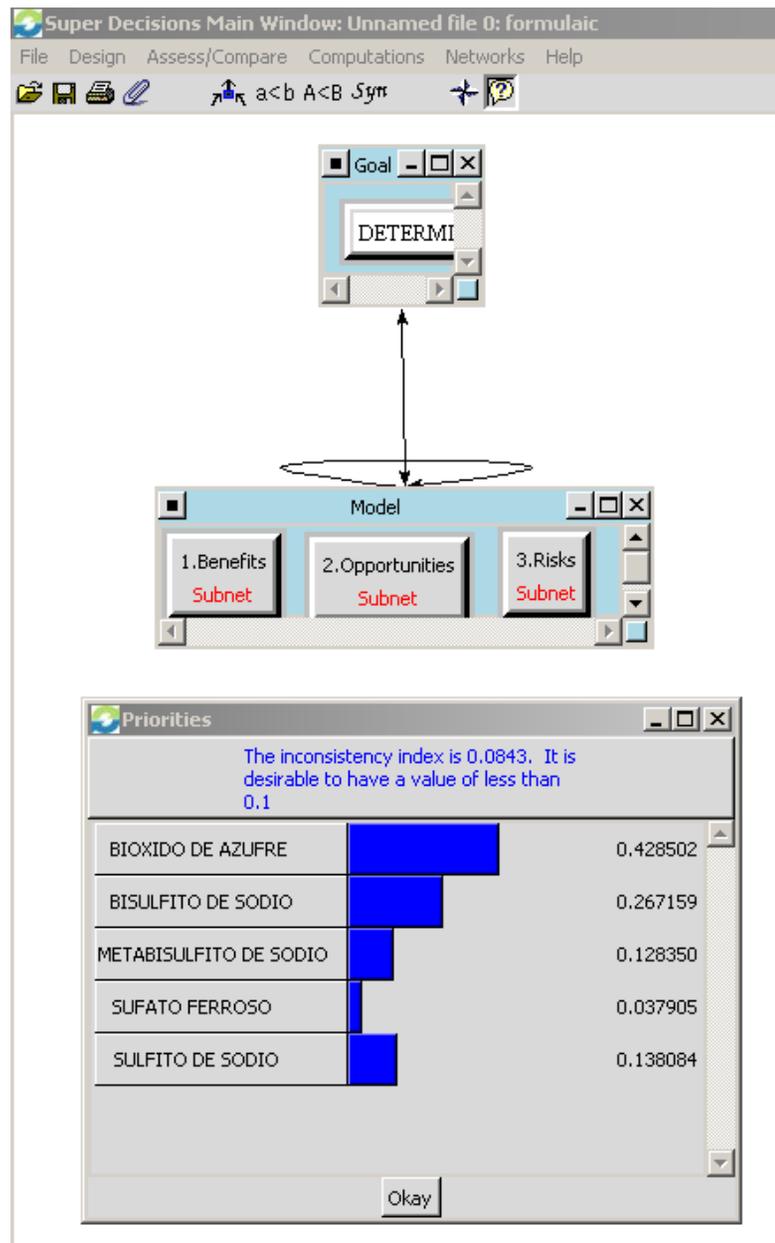
Para hacer los cálculos relacionados con el modelo que permiten elegir el agente reductor más eficiente con base en la encuesta realizada a los expertos previamente seleccionados (

Tabla 12). Se usó el software *SUPER DECISIONS* que implementa el proceso analítico por redes. Este software se usa para tomar decisiones con dependencia y retroalimentación tal y como sucede en los problemas de la vida cotidiana.

Super Decisions extiende el proceso analítico por jerarquías (AHP) que usa los mismos procesos de priorización fundamentales basados en la derivación de prioridades a través de juicios de pares de elementos o de medidas directas [73].

A Continuación se presentan los resultados obtenidos con el modelo.

Primero se calcula el índice de inconsistencia:



Luego se establecen los nodos y la red y los pesos de cada alternativa:

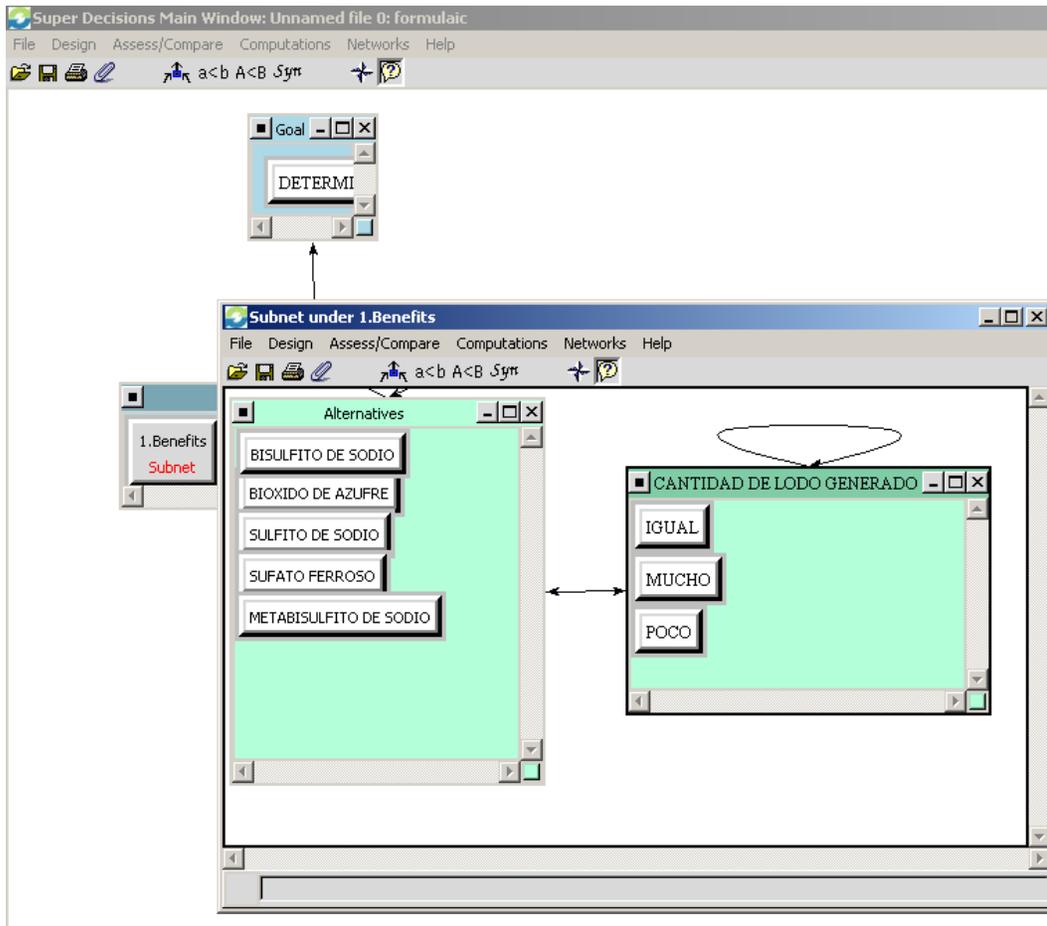
Comparisons wrt "BISULFITO DE SODIO" node in "Alternatives" cluster

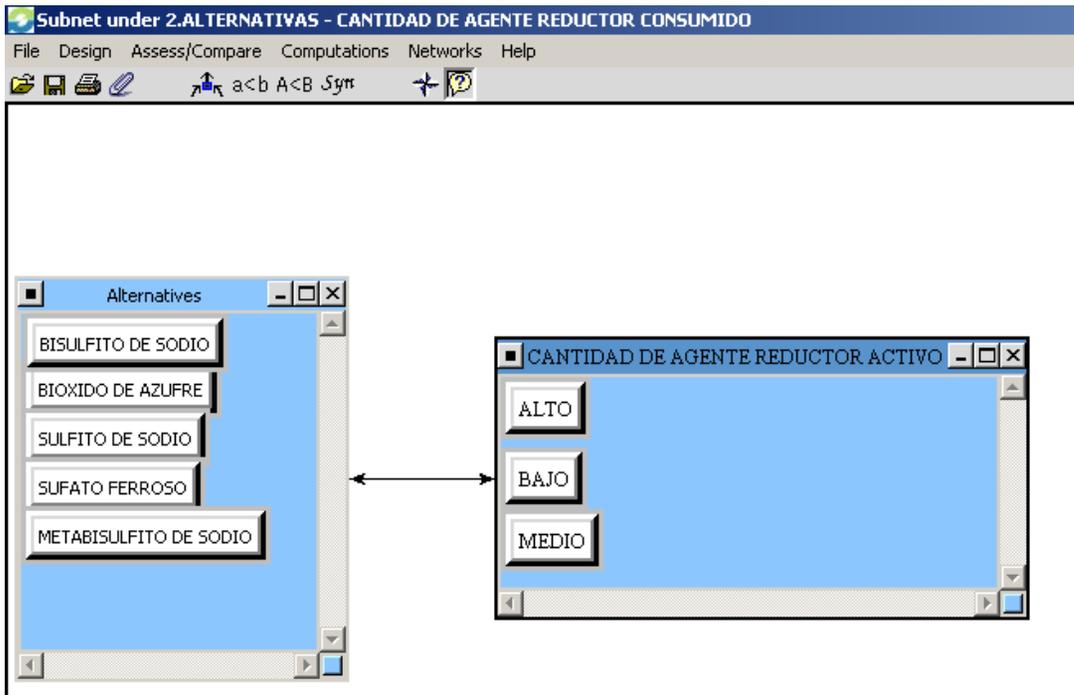
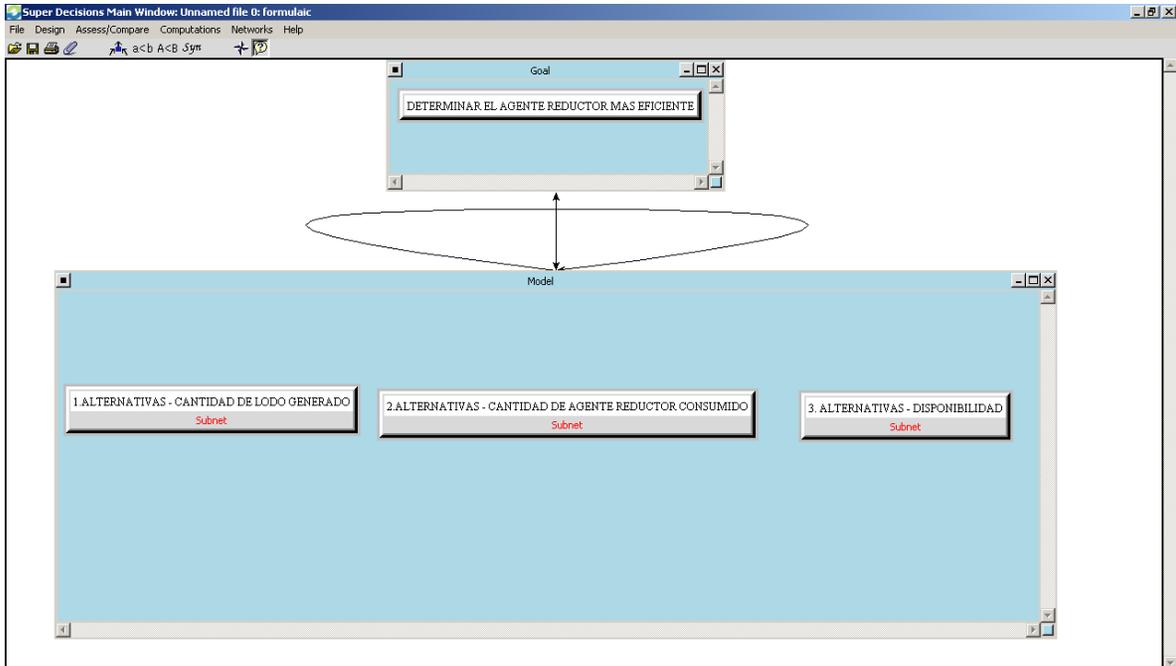
File Computations Misc Help

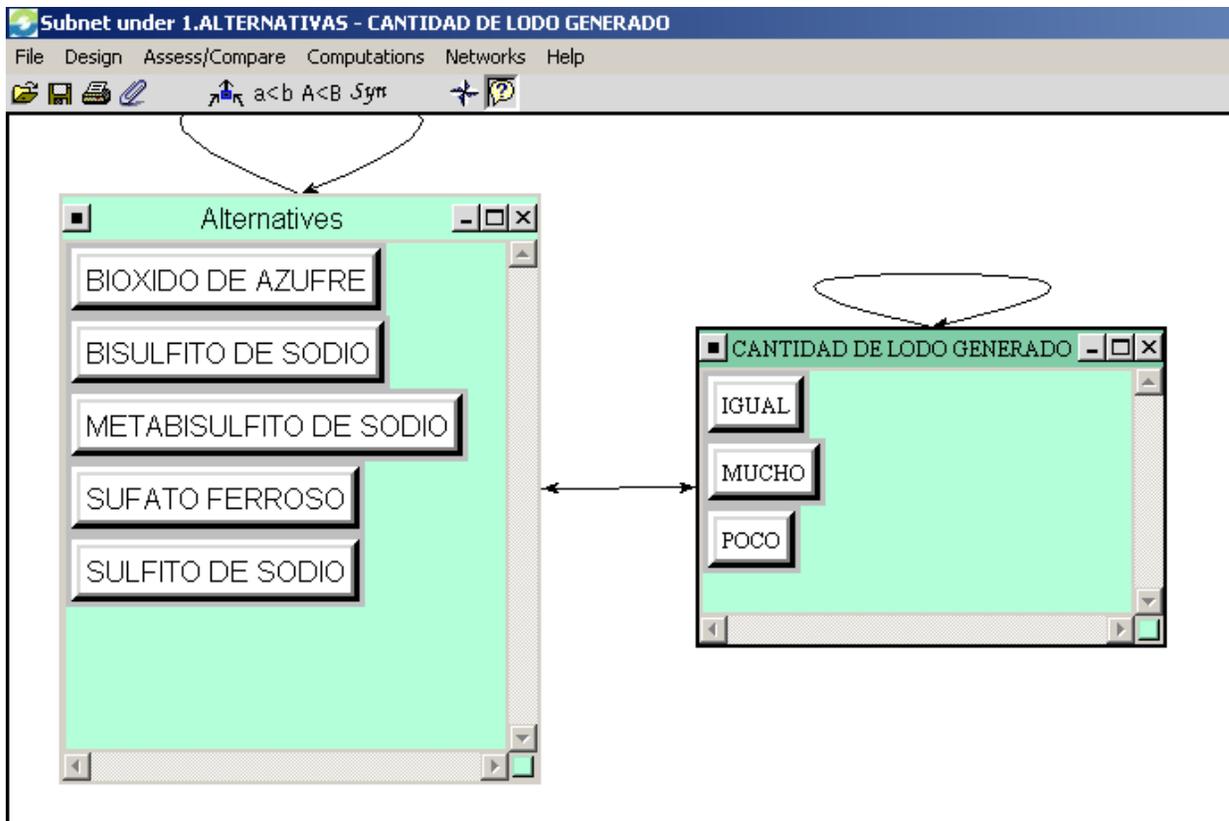
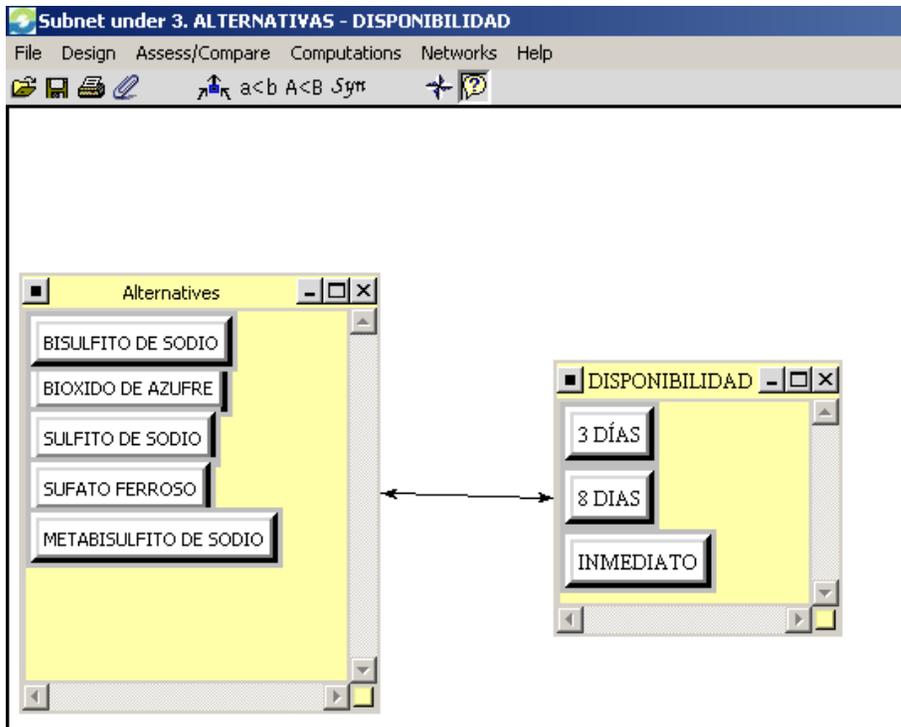
Graphic Verbal Matrix Questionnaire

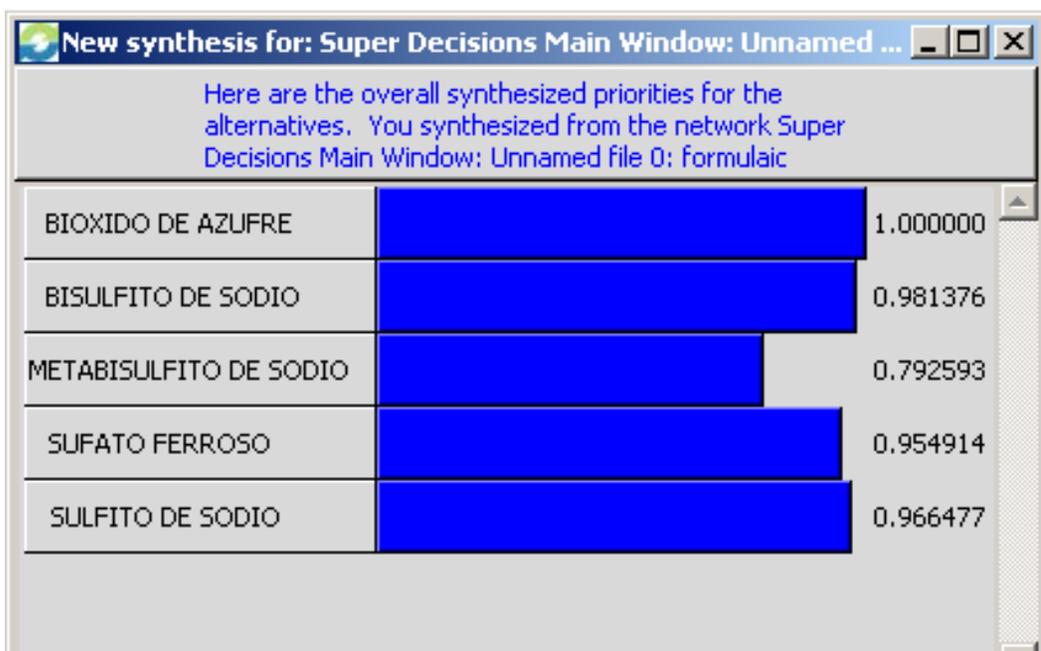
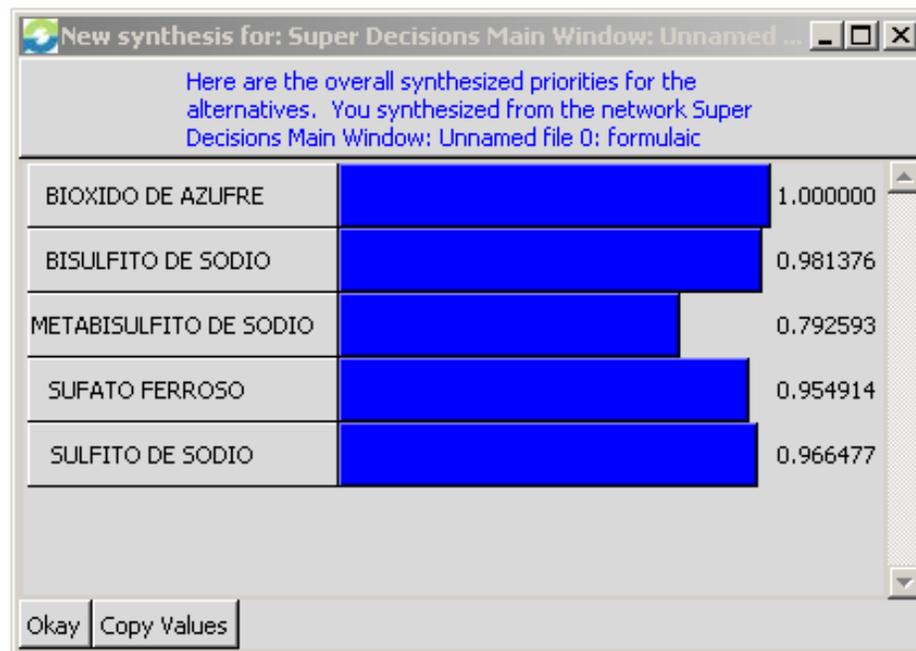
Comparisons wrt "BISULFITO DE SODIO" node in "Alternatives" cluster
METABISULFITO DE SODIO is strongly more important than **SUFATO FERROSO**

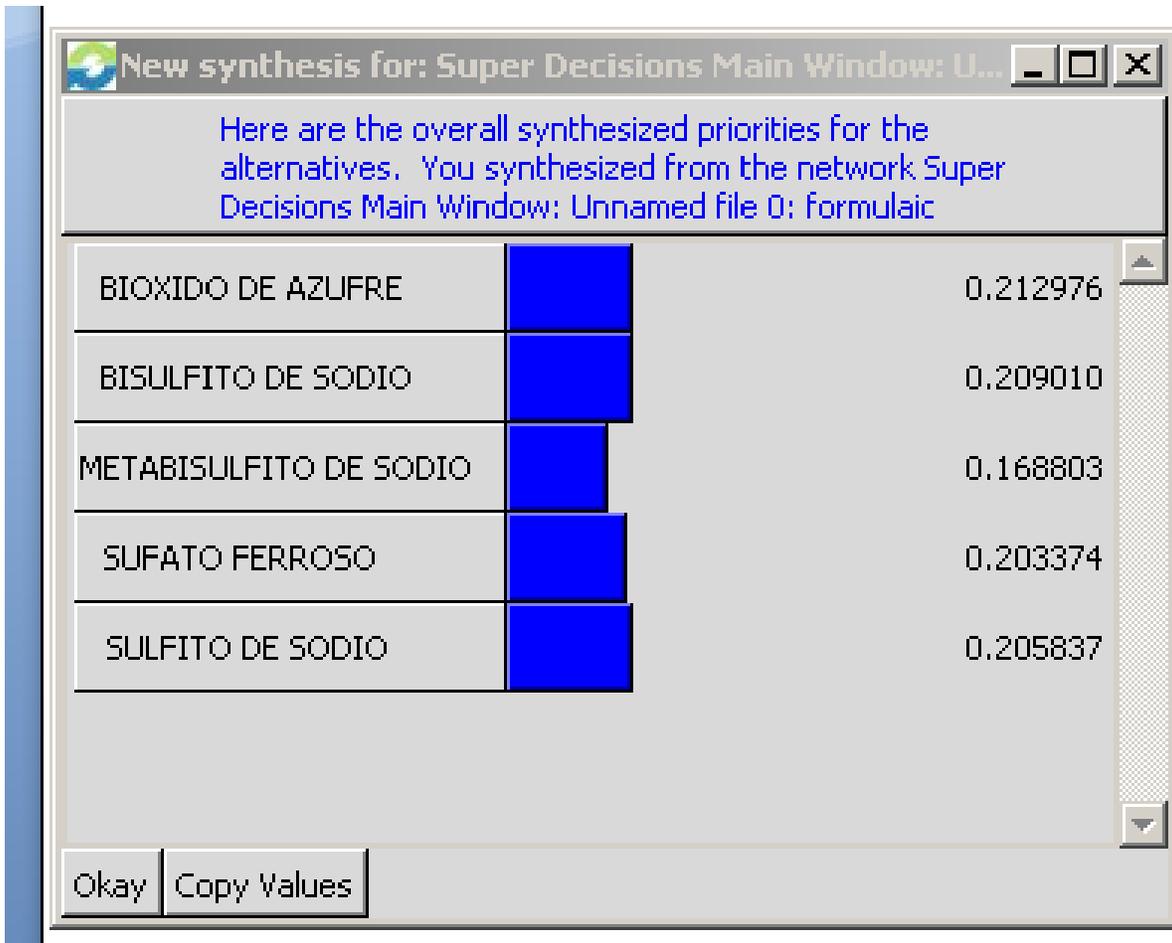
1. BIOXIDO DE AZUFRE	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	BISULFITO DE SODIO
2. BIOXIDO DE AZUFRE	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	METABISULFITO DE SODIO
3. BIOXIDO DE AZUFRE	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	SUFATO FERROSO
4. BIOXIDO DE AZUFRE	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	SULFITO DE SODIO
5. BISULFITO DE SODIO	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	METABISULFITO DE SODIO
6. BISULFITO DE SODIO	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	SUFATO FERROSO
7. BISULFITO DE SODIO	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	SULFITO DE SODIO
8. METABISULFITO DE SODIO	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	SUFATO FERROSO
9. METABISULFITO DE SODIO	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	SULFITO DE SODIO
10. SUFATO FERROSO	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	SULFITO DE SODIO





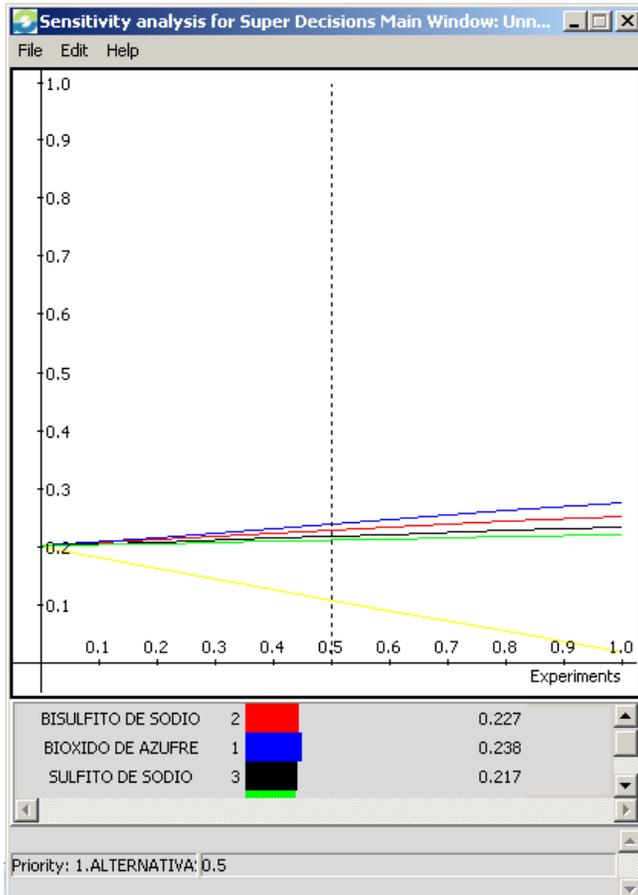






Cluster Node Labels		Goal	Model		
		DETERMINAR EL AGENTE REDUCTOR MAS EFICIENTE	1.ALTERNATIVAS - CANTIDAD DE LODO GENERADO	2.ALTERNATIVAS - CANTIDAD DE AGENTE REDUCTOR CONSUMIDO	3. ALTERNATIVAS - DISPONIBILIDAD
Goal	DETERMINAR EL AGENTE REDUCTOR MAS EFICIENTE	0.250000	0.250000	0.000000	0.000000
Model	1.ALTERNATIVAS - CANTIDAD DE LODO GENERADO	0.166667	0.166667	0.000000	0.000000
	2.ALTERNATIVAS - CANTIDAD DE AGENTE REDUCTOR CONSUMIDO	0.291667	0.291667	0.000000	0.000000

Sensibilidad:



Prioridades:

Icon	Name	Normalized by Cluster	Limiting
No Icon	DETERMINAR EL AGENTE REDUCTOR MAS EFICIENTE	1.00000	0.250000
No Icon	1. ALTERNATIVAS - CANTIDAD DE LODO GENERADO	0.22222	0.166667
No Icon	2. ALTERNATIVAS - CANTIDAD DE AGENTE REDUCTOR CONSUMO	0.38889	0.291667
No Icon	3. ALTERNATIVAS - DISPONIBILIDAD	0.38889	0.291667

De acuerdo con este método la elección es el bióxido de azufre

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1 ANÁLISIS COSTO BENEFICIO

Los métodos de selección ANP y AHP arrojaron al Bióxido de Azufre como el agente reductor más eficiente, y de acuerdo a los costos del reactivo sumados a la cantidad y manejo de lodos generados tenemos el siguiente ranking:

Tabla 27. Ranking agente reductor con mejor resultado costo – beneficio.

AGENTE REDUCTOR ACTIVO	% Aumento en el costo en comparación con el Bióxido de Azufre	RANKING
Bióxido de Azufre	-	1
Bisulfito de Sodio	55	5
Sulfito de Sodio	17	3
Metabisulfito de Sodio	69	6
Sulfato Ferroso	52	4
Hidrosulfito de Sodio	13	2

- El Hidrosulfito de Sodio y Sulfito de Sodio son dos agentes reductores que pueden ser considerados alternativas del Bióxido de Azufre; es el Hidrosulfito uno de los agentes reductores más costosos pero después del Bióxido es el que genera menos cantidad de lodo y por consiguiente es menor el costo de su tratamiento.
- El Sulfato Ferroso es el agente reductor que más lodo genera pero también es el más barato de ahí que el costo total de tratamiento es menor que otros reductores más eficientes pero de costo mayor. Adicionalmente el Sulfato Ferroso es un producto de difícil manejo, muy corrosivo y su disponibilidad es la más complicada.

- El Metabisulfito y el Bisulfito de Sodio cuando se usan generan una cantidad de lodo cercana a la generada por el Bióxido de Azufre, pero ambos requieren adiciones mayores en 50% al Bióxido.
- Es el Bióxido de Azufre el agente reductor más eficiente y con una mejor relación costo beneficio que los demás.

Tabla 28. Costo comparativo de los agentes reductores para el ácido crómico

	Bióxido de azufre	Bisulfito de sodio	Sulfito sódico	Metabisulfito de Sodio	Sulfato ferroso	Hidrosulfito de sodio
Kg Reactivo/Kg CrO₃	1,92	3,12	3,78	2,86	16,68	3,22
Kg H₂SO₄/Kg CrO₃	0,00	1,48	2,94	1,48	5,88	2,40
Kg Ca(OH)₂/Kg CrO₃	2,22	2,22	2,22	2,22	4,44	0,00
Kg Lodo seco/Kg CrO₃	4,03	4,52	4,37	4,60	17,60	2,02
Precio del reactivo \$/Kg	1200,00	4650,00	2350,00	1950,00	1180,00	2550,00
Costo del reactivo \$/Kg CrO₃	2304,00	14508,00	8883,00	5577,00	19682,4	8211,00
Costo del ácido \$/Kg CrO₃	0,00	39,96	79,20	39,96	158,40	201,60
Costo de Cal \$/Kg CrO₃	21,60	21,60	21,60	21,60	39,60	0,00
Costo de manejo \$/Kg CrO₃	3,60	6,12	7,92	5,76	24,12	5,04
Costo del lodo \$/Kg CrO₃	3022,50	3390,00	3277,50	3450,00	13200,0	1515,00
Costo total para reducir 1 Kg CrO₃	6551,70	22615,68	14619,2	11044,32	34284,5	12482,64

Figura 13. Consumo comparativo .de los agentes reductores por Kg. de ácido crómico

- En la Figura 13 se puede observar que el consumo de Sulfato Ferroso como agente reductor en el tratamiento de aguas residuales del cromado es mucho mayor que cualquiera de los otros agentes evaluados.
- Uno de los principales inconvenientes al usar Sulfato Ferroso es su alta toxicidad por lo que los industriales del sector galvanico prefieren no usarlo, pues su inhalación causa malestar, irritación en los ojos y piel.

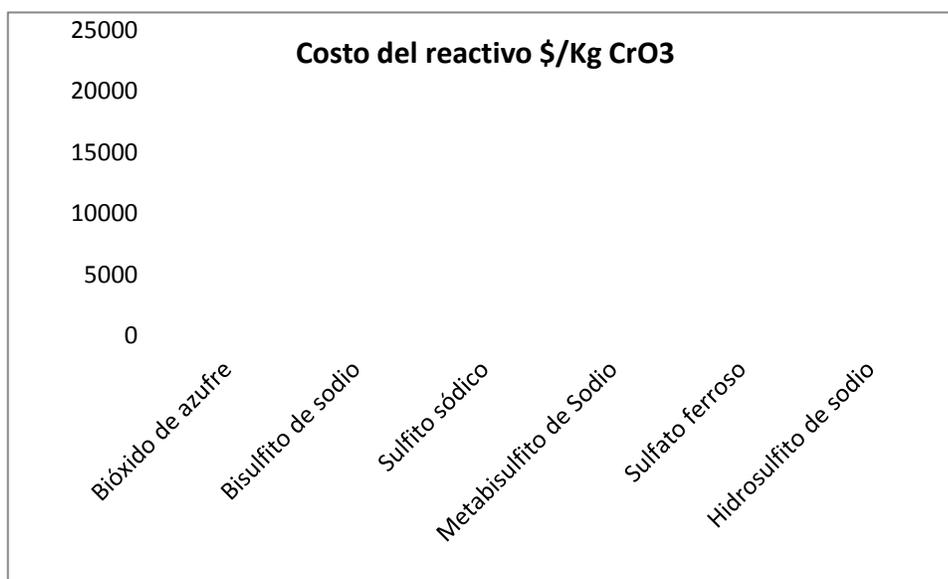


Figura 14. Costo comparativo .de los agentes reductores por Kg. de ácido crómico.

- Todos los compuestos de sodio en su forma bisulfito, sulfito, Hidrosulfito y Metabisulfito son agentes con una aceptable eficiencia reductora, pero su costo y la cantidad necesaria para reducir el cromo, los hace menos competitivos que el Bióxido de Azufre.
- Si se utiliza Sulfato Ferroso se debe invertir más dinero por Kg. de cromo que con los demás reductores.

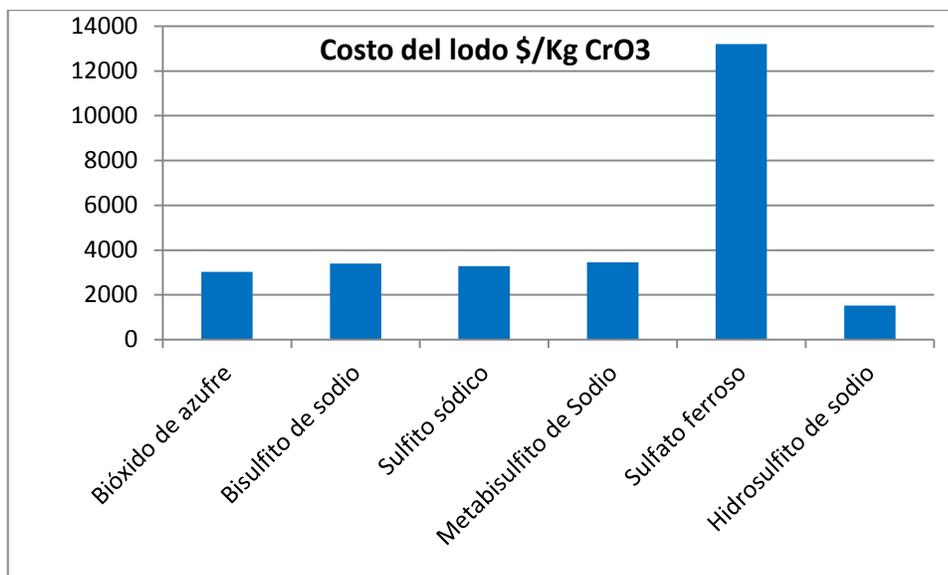


Figura 15. Costo comparativo .del lodo generado por Kg. de ácido crómico.

- En la Figura 15 se observa que el precio del lodo generado cuando se usa sulfato ferroso como agente reductor es mayor que con cualquier otro reductor evaluado, la alta generación de lodos y su manejo hacen del sulfato ferroso un reactivo poco atractivo.
- Al usar hidrosulfito de sodio e costo del lodo generado es el menor puesto que no hay que usar cal para ajustar e pH y favorecer la precipitación, en este caso adiciones controladas de soda cáustica es suficiente para garantizar la precipitación completa.

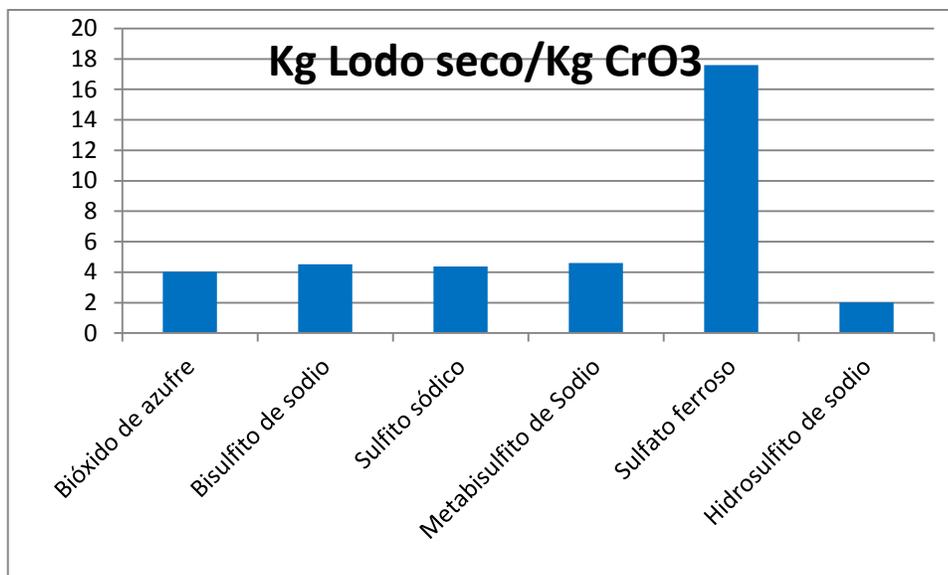


Figura 16. Costo comparativo .del lodo generado por Kg. de ácido crómico.

- De todos los agentes reductores evaluados, queda demostrado que el que genera menos lodo es el Hidrosulfito de sodio seguido por el bióxido de azufre, generando de esta forma un menor impacto ambiental sobre el medio ambiente.
- El Hidrosulfito de sodio es más costoso que el bióxido de azufre, por lo que el tratamiento con este último es más económico.
- Es clara la diferencia que hay entre la formación de lodos cuando se usa sulfato ferroso en comparación de los demás agentes reductores evaluados.

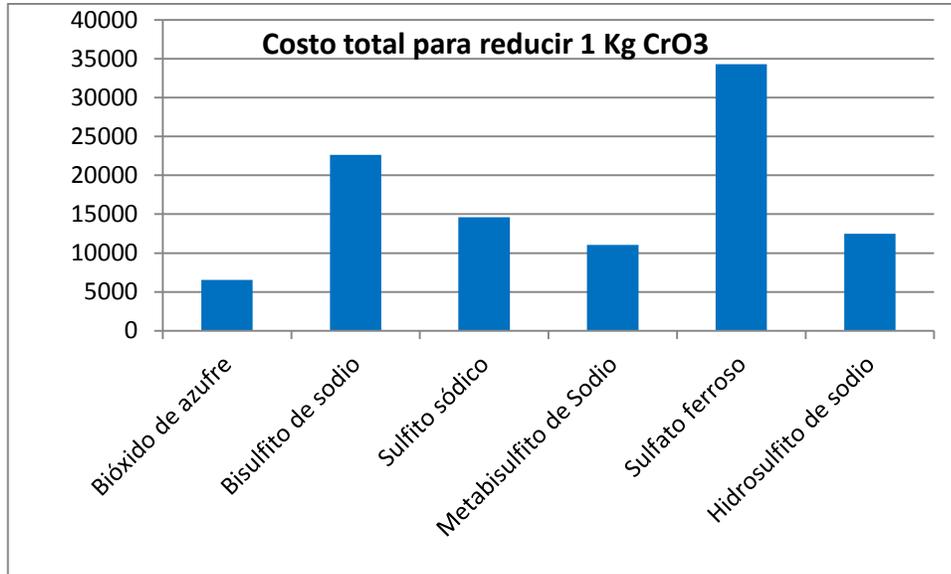


Figura 17. Costo total comparativo para reducir 1 Kg. de ácido crómico.

- Teniendo en cuenta todos los costos asociados al tratamiento de 1 Kg de Trióxido de Cromo (precio reactivo, cantidad de reactivo, cantidad y manejo de lodo generado), se observa que el agente reductor más económico es el Bióxido de Azufre.
- El sulfato ferroso es el más caro en lo que a tratamiento total se refiere, seguido por el bisulfito de sodio. Los demás agentes reductores tienen un costo similar entre sí, pero más alto que el del bióxido de azufre.

6.2 CONCLUSIONES

El proceso analítico por jerarquías – AHP- sirve para tomar decisiones mientras que el proceso analítico por red -ANP- sirve para tomar decisiones con dependencia y retroalimentación; el proceso ANP es el más parecido al como los seres humanos tomamos decisiones.

En la determinación del agente reductor más eficiente por la metodología AHP cada criterio fue evaluado por su importancia con el objetivo, y cada alternativa fue evaluada para conocer cuál es la preferida con respecto a cada criterio. Este proceso arrojó como resultado que el agente reductor activo (objetivo) más eficiente es el bióxido de azufre y el criterio más importante es la disponibilidad del agente reductor, el segundo criterio en importancia es la cantidad de agente reductor necesario y deja en último lugar a la cantidad de lodo generado.

Cuando se evaluó el problema con el método ANP los resultados fueron muy similares, el agente reductor más eficiente fue el bióxido de azufre, y los criterios más importantes la cantidad de agente reductor consumida en el proceso de reducción del cromo hexavalente y su disponibilidad.

El resultado refleja las preferencias de los siete expertos quienes hicieron los juicios, incorporando sus preferencias y deseos personales. El uso de expertos, permite que se disminuya la subjetividad de la elección de una determinada opción y permite aumentar el conocimiento de un sistema que en este caso es una PTAR.

La elección del agente reductor bióxido de azufre tanto por el método AHP como ANP es acorde a los criterios definidos para ambos modelos. En este estudio particular no se tuvo en cuenta el impacto ambiental de los diferentes agentes reductores, la inclusión de este criterio se recomienda para un trabajo posterior donde se pueda hacer un estudio más detallado del problema.

En la actualidad los industriales del sector galvánico utilizan el hidrosulfito de sodio porque es el más común sin tener en cuenta otro criterio para su elección y no conocen el bióxido de azufre como agente reductor más eficiente según los criterios definidos en este estudio.

Por un lado el bióxido de azufre es el agente reductor que menos impacto genera sobre el medio ambiente al producir menor cantidad lodos, pero en la reacción de reducción se pueden liberan gases altamente tóxicos. Por lo anterior es recomendable incluir el impacto ambiental del uso de cada agente reductor como criterio en la evaluación de alternativas.

El uso de las técnicas AHP y ANP arrojaron los mismos resultados permitiendo que se seleccionara el mismo agente reductor, resultado igual al del análisis teórico, con lo cual se evidencia que son técnicas que permiten disminuir los tiempos, los costos y los impactos generados sobre el medio ambiente, para tomar decisiones sobre un sistema complejo como es una PTAR de cromado.

Para obtener mejores resultados se recomienda utilizar técnicas para la selección de los criterios que eliminen la subjetividad del proceso usado en el presente estudio. Además se recomienda ampliar el estudio incluyendo otros criterios importantes como el impacto ambiental de los agentes reductores utilizados.

***REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS***

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 TOMKIEWICZ, Micha. Environmental aspects of electrodeposition. En: SCHLESINGER, Mordechai y PAUNOVIC, Milan. Modern Electroplating. 5ª edición. New York. John Wiley & Sons, Inc. 2010. P. 555-571
- 2 LARSEN, Bjorn. Cost of Environmental Damage: A Socio-Economic and Environmental Health Risk Assessment. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2004.
- 3 LARSEN, Bjorn. Cost of Environmental Damage: A study of Colombia. Bogotá. Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2004
- 4 CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. (2001: New York). Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático: Ideam, 2001.
- 5 DIRECCIÓN DE DESARROLLO URBANO Y POLITICA AMBIENTAL. Consolidar una Gestión Ambiental que promueva el Desarrollo Sostenible (propuesta para discusión): Visión Colombia II Centenario. 2019. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación. Imprenta Nacional. 2007. 140 p.
- 6 TAPIA Jaime. Evaluación de la contaminación por cromo en un sistema fluvial de Chile Central: Una propuesta para la disminución en su origen. Tesis Doctoral. Centro EULA, Universidad de Concepción, Concepción, Chile (1997).
- 7 PANSINI, M., COLELLA, C., GENNARO, M. de. Chromium Removal from Water by Ion Exchange Using Zeolite. En: Desalination, No. 83 (1991). p. 145-157.
- 8 CHESSIN, Hyman, et al. Chromium Plating. En: DAVIS J.R. Metals Handbook – Volume 5, Metal Park, OH. New York: American Society for Metals. 2001. P. 455.
- 9 JAMES, Matthew G., BEATTIE, James K. y KENNEDY, Brendan J. Recovery of chromate from electroplating sludge. En: Waste Management and Research. Volomun 18, No. 4 (agosto, 2000) p. 380-385..

- 10 EPA. Chromium Compounds. [en línea]. <http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/chromium.html> [citado en marzo de 2011]
- 11 CONCURRENT TECHNOLOGIES CORPORATION. Information Source for Cadmium and Chromium Plating Alternatives. [en línea]. < <http://www.cdcralternatives.ctc.com> > [citado en abril de 2011].
- 12 GRAVES, Beverly. Alternatives to Hexavalent Chromium and Chromium Plating. En: Automotive Finishing. (Winter 2000). [En línea]. http://findarticles.com/p/articles/mi_m0HRR/is_2000_Winter/ai_75577967/ [citado en junio de 2011].
- 13 HABARTH, Maureen, HUBBEL, Lauren y SLEMBROUCK, Matt Van.. Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas: Escuela la Base Santa Cruz, Bolivia. Houghton: Michigan Technological University. 2006
- 14 CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 99 de 1993
- 15 PINKERTON, H. L.. Disposición de las aguas residuales sobrantes inorgánicos. 1. Ed. Mexico D.F: Compañía editorial continental S.A .Junio de 1967. 250 p.
- 16 EPA. Guide to Cleaner Technologies: Alternative Metal Finishes, 1994. [en línea] <http://www.getf.org/file/toolmanager/O16F6379.pdf> [citado en junio de 2011].
- 17 LÓPEZ, Joseba y DOLADO José Javier. Estudio de los métodos de estimación: AHP y redes Bayesianas. En: TALLER SOBRE APOYO A LA DECISIÓN EN INGENIERÍA DEL SOFTWARE (8º : 2007 : Zaragoza). Actas del 8º taller sobre apoyo a la decisión en ingeniería del software. Zaragoza, España: Remis. 2008. p 17-24
- 18 MIRANDA, Eduardo. Improving subjective, estimates using paired comparisons. En: IEEE Software, 18(1) (Jan/Feb 2001). p. 87-91.
- 19 LABRANDERO, J. L. y MARTINEZ Vega, J. Sistemas de información geográfica en la planificación ambiental de áreas de montañas. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 1998.136 p.
- 20 WANG, Ying-Ming and ELHAG, Taha M. S. An approach to avoiding rank reversal in AHP En: Decision Support Systems., 42(3) (Dec, 2006) p. 1474 1480.

- 21 SAATY, Thomas. Método Analítico Jerárquico (AHP): Principios Básicos. En: MARTÍNEZ, Eduardo y ESCUDEY, Mauricio. Evaluación y Decisión Multicriterio. Reflexiones y Experiencias. Santiago de Chile: Editorial Universidad de Santiago. 1998. p 17-46.
- 22 GARCIA, Luis Alberto. Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales. Barcelona. 2004 130 p (Tesis doctoral) Universidad Politécnica de Cataluña..
- 23 SANCHEZ, Carla. Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la Cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica. En: Recursos Naturales y ambiente (2004) p. 89-91.
- 24 CAMACHO-REA, I y AGUIRRE, R. Análisis multicriterio y evaluación del beneficio ambiental de la incineración de residuos sólidos municipales en la ciudad de México. México D.F. 2003. 150 p. (Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería Ambiental). Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- 25 WIJNMALEN, Diederik J.D. Analysis of benefits, opportunities, costs, and risks (BOCR) with the AHP-ANP: A critical validation. En: Mathematical and Computer Modelling Volumen 46, No, 7-8 (Octubre, 2007) p. 892–905..
- 26 MARTÍNEZ Eduardo y ESCUDEY Mauricio. Evaluación y decisión multicriterio: Reflexiones y Experiencias. Primera Edición. Santiago de Chile: editorial Universidad de Santiago. 1998. p 9-16.
- 27 PASTOR Ferrando, J P, BELTRÁN Aragonés, P, HOSPITALER Pérez, A and GARCÍA Melón, M. An ANP-and AHP-based approach for weighting criteria. En: Journal of the Operational Research Society. Volumen 61, No. 6 (2010). p. 905-916.
- 28 SAATY Thomas. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh: RWS Publications. 2000. 477 p.
- 29 WEDLEY, W.C., Choo, E.U. and SCHONER B. Magnitude adjustment for AHP benefit/cost ratios. En: European Journal of Operational Research. Volumen 133 (2001). p. 342–351.

- 30 PASTOR-Ferrando, JP. Aplicación de las técnicas de evaluación y decisión multicriterio discretas a las fases de adjudicación y realización de proyectos de obra de las administraciones públicas. Valencia. 2007. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.
- 31 PONGPENG, J and LISTON, J. A multicriteria and multidecision-maker's model in tender evaluation. En: Construction Management and Economics. Volumen 21. (2003). p. 21–30.
- 32 SAATY, Thomas. The Analytic Network Process. Pittsburgh: RWS Publications. 1997. 322 p.
- 33 SAATY, Thomas. Fundamentals of the analytic network process. En: The International Symposium on the Analytic Hierarchy Process. (Kobe, Japan, August 12-14, 1999) Proceedings ISAHP 1999. p. 12-14..
- 34 SAATY, Thomas. The Analytic Network Process, Fundamentals of Decision Making and Priority Theory, 2nd ed. Pittsburgh: RWS Publications. 2001. 315 p.
- 35 SAATY, Thomas. OZDEMIR, M.S. The Encyclicon: A Dictionary of Decisions with Dependence and Feedback Based on the Analytic Network Process. Pittsburgh: RWS Publications, Pittsburgh, 2004. 292 p.
- 36 SAATY Thomas. Theory and Applications of the Analytic Network Process. Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks. Pittsburgh: RWS Publications. 2005. 352 p.
- 37 MONTERDE, Rafael. Análisis de la aplicabilidad del concepto de relación de superación en la gestión de problemas ambientales. Valencia. 2006 (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.
- 38 SAATY Thomas. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision making. En: FIGUEIRA J, GRECO S and EHRGOTT M. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. NewYork: Springer. 2005. p 345–407.
- 39 ESPINOSA Osorio, David. Teoría general de los sistemas Ludwig Von Bertalanffy. En: Teoría de la organización. 2009. [en línea].

<http://www.gestiopolis.com/dirgp/adm/teoriaadministrativa.htm> [consultado octubre de 2011]

40 MAHNER, Martin y BUNGE, Mario. Foundations of Biophilosophy.. Berlín: Springer. 1997. 423 p.

41 JOHANSEN, Oscar. Introducción a la Teoría General de Sistemas. Mexico D.F.: Editorial Limusa, S. A. de C. V. Grupo Noriega Editores. 2004. 168 p

42 SUTTON, David B. y HARMON, N. Paul. Fundamentos de Ecología. Mexico D.F.: Editorial Limusa, S. A. de C. V. Grupo Noriega Editores. México, D. F. 2000. 293 p

43 KARP, G. Biología Celular y Molecular – conceptos y experimentos, Cuarta Edición. Mexico D.F.:Mc Graw Hill, 2005. 330 p

44 BOLSOVER, S. R., HYAMS, J. S., SHEPHARD, E. A., WHITE H. A., and WIEDEMANN C. G., Cell biology: A Short Course. Second edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 345 p.

45 MADER, Sylvia S. Biology. Nineth edition. Mexico D.F.: McGraw-Hill. 2007. 576 p

46 BELLO M. Consideraciones mínimas entorno a la educación ambiental. En: Memorias de Arquitectura, Ingeniería y Medio Ambiente. Parte I. CETA/ISPJAE. (1996) p. 45-69

47 MURRAY, J. D. Mathematical Biology. Third Edition. New York: Springer. 2002. 551 p

48 STROSCIO, M. A. and DUTTA, M., Biological Nanostructures and Applications of Nanostructures in Biology: Electrical, Mechanical, and Optical Properties. New York: Springer. 2004. 192 p

49 DAILY, G. C. Nature's services: social dependence on natural ecosystems. New York: Island Press. 1997. 412 p

50 BENYUNS, J. M. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. New York: Harper Collins Publishers. 2002. 204 p

51 BADRI, D. El desarrollo sustentable: un cuadro analítico para la acción. En: Alternativas Sub. No. 4 (1995). p. 103-105

52 ERZI, IPEK. An Istanbul perspective on bridging divides for water. Istanbul; 5th World Water Forum Secretariat, 2010. 100 p.

53 FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).. FAOTERM. Base de datos especializada, multilingue. New York: ONU. 2002.

54 del BELLO, Chau. Ingeniería y Medio Ambiente. Parte I. CETA/ISPJAE: Pequeño Diccionario Ambiental. Buenos Aires. Universidad de la Plata. 1999. 160 p.

55 ABUIN, Graciela, VALENTINNI, Cristóbal, HOLTZER, Edgardo. Producción más limpia en empresa de cromado duro. Buenos aires: PLEDS. 2004. 239 p.

56 COBOS, Oscar, Hernández, Humberto y LAVERDE Dionisio. Reducción Del Cromo Contenido En Efluentes Líquidos De La Industria Del Cuero, Mediante Un Proceso Adsorción – Desorción Con Algas Marinas. En: Scientia et Technica Año XI, No 29, (Diciembre de 2005). p. 115-120..

57 ANCO, Percy. Procedimiento para la separación de cromo hexavalente de efluentes mineros. Lima. 2004. 100 h. (Tesis para optar al título de Ingeniero Metalurgico). Universidad mayor de San Marcos.

58 FEBLES, A. Un modelo de referencia para la gestión de configuración en la PYME de Software. La Habana. 2003. 120 h. (Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas). Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría.

59 LÓPEZ, M, SAN MIGUEL, G y ARGILAGOS, S. Diseño y validación de un cuestionario para la evaluación del estado de la superación del profesional en los servicios farmacéuticos de Cuba. En: Revista de Organización de Farmacéuticos Ibero-Latinoamericanos. Volumen. 18 No. 1. (2008). p. 21-26.

60 FALCONÍ, Fander. Instrumentos económicos para la gestión ambiental: decisiones monocriteriales vs decisiones multicriteriales. Análisis multicriterio aplicado a la parte ambiental. 2011 [en línea]. <<http://es.scribd.com/doc/74244013/Analisis-multicriterio-aplicado-a-la-parte-ambiental>> [consultado enero de 2012]

61 SCHLESINGER Mordechay. Modern Electroplating. 4 ed. New York: Wiley interscience. 2000. 736 p

- 62 CYERT, R. M. y MARCH, J. Teoría de las decisiones económicas de la empresa. Mexico D.F.: Ed. Herrero. México. 1965. 230 p.
- 63 KONOW, I. y PÉREZ, G. Método Delphi. 1990. [en línea]. <http://geocities.com/Pentagon/Quarters/7578/pros01-03.html>. [consultado marzo de 2011].
- 64 LOUBET, Beatriz. Manual de Expert Choice. Facultad de ciencias económicas. Universidad del Cuyo. [en línea] <http://www.expertchoice.com/how-our-software-helps/> [consultado enero de 2012].
- 65 BEINAT, E. Value functions for environmental management. Boston: Kluwer Academic Publishers. 1997. p. 163 – 167.
- 66 BOJÓRQUEZ, L. A., JUÁREZ, L. y CRUZ, G. Environmental assessment. Integrating fuzzy logic, optimization, and GIS for ecological impact assessments. En: Environmental Management. Volumen. 30. Nº 3. (2002). p. 418-433.
- 67 CANTER, L.W. Environmental impact assessment. Second Edition. New York: McGraw-Hill. 1996.
- 68 GÓMEZ, Domingo, MORERA, Agustín, Pereira, David y Villarino, Teresa. Estudio del impacto ambiental de un aeródromo. En: Informes de la Construcción, Volumen 47, No 441-442. (1996).
- 69 ACCORSI, CA, BANDINI, M FORLANI, L, Mercuri, AM, TREVISAN G. An overview of Holocene Forest Pollen Flora/Vegetation of the Emilia Romagna Region – Northern Italy. En: Archivio Geobotanico. Volumen 5 No. 1-2. (1999) p. 3–27.
- 70 CLOQUELL, V. Propuesta metodológica para la validación previa de indicadores y funciones de valor en el problema unificado de localización y evaluación del impacto ambiental de proyectos. Valencia 2003 (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.
- 71 SANCHEZ, JJ, HALLENBERG, C.; BØRSTING, C., HERNANDEZ, A. and Morling, N. High frequencies of Y chromosome lineages characterized by E3b1, DYS19-11, DYS392-12 in Somali males. En: European Journal of Human Genetics. Volumen 13 No. 7 (julio de 2005) p. 856–866.

72 GUTIÉRREZ, F. Diseño y validación de un sistema de indicadores de sostenibilidad para la evaluación de áreas naturales con uso turístico y su aplicación al territorio Colombiano. Valencia. 2011. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.

73 Manual Super Decisions. [en línea] <http://www.superdecisions.com/> [consultado en enero de 2012].